

## **NOTE TO USERS**

**This reproduction is the best copy available.**

**UMI**



UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie civil

# DÉVELOPPEMENT D'UN CONCEPT DE PONT FERROVIAIRE MOBILE

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : génie civil

Maude TRÉPANIER

Jury : Frédéric LÉGERON (directeur)  
Pierre LABOSSIÈRE  
Nathalie ROY

Sherbrooke (Québec) Canada

Décembre 2011



Library and Archives  
Canada

Published Heritage  
Branch

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file Votre référence*

*ISBN: 978-0-494-88867-4*

*Our file Notre référence*

*ISBN: 978-0-494-88867-4*

#### NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

#### AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

# Canada

*À la mémoire de mes grands-parents qui m'ont inculqué l'importance des études  
et au reste de la famille qui ne cesse de m'encourager*

# RÉSUMÉ

L'interruption du réseau ferroviaire engendre des pertes financières importantes pour les entreprises de transport et la société en général. Afin de limiter cet impact, le CN entrepose actuellement des poutres « d'urgence » sur l'ensemble de son territoire pour diminuer le temps d'apport en matériaux sur les sites endommagés. Ce procédé est toutefois difficile à mettre en place et le contournement de la voie est parfois impossible. Le développement d'un concept de pont ferroviaire mobile pouvant se transporter et être mis en service en 48h pourrait donc être une bonne solution à ce problème. En plus de devoir être utilisable pour diverses longueurs de travée (5 à 28m), celui-ci devra s'ajuster aux culées, piliers et appuis existants. Parmi les structures d'acier possibles, trois solutions ont été retenues : le pont (a) bi-poutres, (b) à poutres latérales et (c) à treillis latéraux. La méthode de construction ainsi que la géométrie ont d'abord été prises en considération. Ces trois alternatives ont ensuite été analysées en fonction de plusieurs critères. Le nombre de boulons, la quantité de matériau nécessaire et les dimensions des sections préfabriquées ont donc été considérés afin de déterminer quelle solution est la plus adéquate pour ce type d'utilisation.

**Mots-clés :** Pont, pont ferroviaire, structure en acier, pont mobile



# ABSTRACT

Interruption of railway traffic creates important financial losses for the transportation utilities and society at large. At this moment, to limit this impact, the CN uses emergency girders stored around their territory to decrease the time to transport the materials to the site. However, this method is difficult to put in place and bypass of the traffic is not possible everywhere. The development of a portable railway bridge is interesting for this purpose. This structure has to be transported, erected and in services within 48h. This type of bridge should also be adjustable in length to allow reusing of the existing bearings, piers and abutments (5 to 28m of span). Between the steel superstructure possibilities, three solutions have been chosen: (a) plate girder, (b) through girder and (c) through truss. The geometry and the construction method are the particularities to consider. After those conceptions, the three alternatives have been analyzed as a function of many criteria. The number of bolts, the quantity of material and the dimension of the prefabricated sections were considered to determine the best solution for this kind of utilization.

**Mots-clés :** Bridge, Railway Bridge, Steel Structure, Mobile Bridge





# REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de maîtrise, monsieur Frédéric Légeron. Je lui suis très reconnaissante d'avoir su répondre à mes questions et permis de compléter une session de perfectionnement à l'étranger. J'ai également apprécié nos discussions concernant mon cheminement professionnel. Au cours de ce projet, j'ai beaucoup appris techniquement, mais également sur ma personne et il y a contribué, à sa façon.

De plus, le partenariat avec le *Canadian National Railway* (CN) m'a permis d'obtenir plusieurs informations essentielles à la réalisation de ce projet et m'a fourni une aide financière pendant toute sa durée. Je tiens donc à remercier les ingénieurs de cette entreprise, plus particulièrement messieurs Nigel Peters et George Nowak, qui ont grandement contribué à ce projet en mettant à ma disposition de nombreux documents de conception et des plans créés par leur département de structure. Je tiens donc à leur souligner ma reconnaissance pour cette aide.

Je tiens à remercier tout particulièrement madame Annie Dupéré, du service à la vie étudiante (études à l'étranger), d'avoir favorisé la communication avec l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Grâce à elle et à la bourse reçue par le ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, j'ai eu l'occasion d'aller en Suisse pour y suivre des cours de perfectionnement en structure de ponts.

Finalement, je tiens à remercier ma famille d'avoir su m'appuyer et m'encourager. La réalisation de ce projet aurait été impossible sans ce soutien. Je tiens plus particulièrement à remercier mes parents d'avoir été disponibles à toute heure du jour et de la nuit. Ceux-ci ont su partager mes bons moments et ceux plus difficiles à tous les jours de l'avancement de ce projet. Merci infiniment!



# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
1.1	Mise en contexte et problématique	1
1.1.1	Historique des voies ferrées canadiennes	1
1.1.2	Importance économique du transport ferroviaire au Canada	2
1.1.3	Pérennité du réseau en cas de rupture d'un ouvrage	3
1.1.4	Solution existante au CN	4
1.2	Définition du projet de recherche	4
1.3	Objectifs	5
1.4	Contributions originales	6
1.5	Plan du document	6
<b>2</b>	<b>ÉTAT DES CONNAISSANCES</b>	<b>7</b>
2.1	Ponts ferroviaires	7
2.1.1	Structures du CN	8
2.1.2	Critères de conception des ponts ferroviaires	18
2.1.3	Contraintes spécifiques pour les ponts ferroviaires mobiles	21
2.2	Ponts transportables et ponts à construction rapide	25
2.2.1	Types de pont	29
2.2.2	Connexions	32
2.2.3	Méthodes de construction	34
2.2.4	Matériaux structuraux pour les ponts mobiles	35
2.3	Comparaison : ponts routiers versus ponts ferroviaires	36
2.3.1	Travée simple versus travées continues	36
2.3.2	Ballast versus enrobé bitumineux	36
2.3.3	Locomotive <i>Cooper E80</i> versus camion <i>CL-625</i>	37
2.3.4	Flèche	40
2.3.5	Fatigue	41
2.4	Élaboration du concept	42
2.4.1	Types de pont	42
2.4.2	Connexion	43
2.4.3	Transport, érection et démantèlement	43
2.4.4	Matériaux	43
<b>3</b>	<b>ÉTUDE DE CONCEPT</b>	<b>45</b>
3.1	Démarche générale	45
3.2	Alternatives	45
3.2.1	Pont poutres	45
3.2.2	Pont bi-poutres	48
3.2.3	Pont à poutres latérales	50
3.2.4	Pont à treillis latéraux	53

3.2.5	Pont à treillis fermé.....	59
3.3	Résumé.....	61
3.3.1	Analyse.....	61
3.3.2	Choix retenus.....	63
<b>4</b>	<b>ÉTUDE PRÉLIMINAIRE</b>	<b>65</b>
4.1	Amélioration du concept.....	65
4.1.1	Portée.....	65
4.1.2	Traverses.....	65
4.1.3	Ajustement en longueur.....	65
4.1.4	Ajustement en profondeur.....	66
4.2	Solutions.....	66
4.2.1	Pont bi-poutres.....	66
4.2.2	Pont à poutres latérales.....	78
4.2.3	Pont à treillis latéraux.....	83
<b>5</b>	<b>ANALYSE MULTICRITÈRES</b>	<b>93</b>
5.1	Critères.....	93
5.1.1	Gabarit sous le pont.....	93
5.1.2	Transportabilité et entreposage.....	94
5.1.3	Constructibilité.....	96
5.2	Comparaison.....	100
<b>6</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>103</b>
6.1	Recommandations.....	104
6.2	Recherches futures.....	104
<b>A</b>	<b>NOTES DE CALCUL</b>	<b>105</b>
A.1	Équations.....	105
A.1.1	Poutres.....	105
A.1.2	Raidisseurs.....	106
A.1.3	Connexions.....	107
A.2	Exemple de calcul de la capacité d'une poutre.....	108
A.2.1	Données.....	108
A.2.2	Cisaillement.....	108
A.2.3	Moment.....	108
A.2.4	Capacité.....	109
A.3	Exemple de calcul de la capacité d'une connexion.....	109
A.3.1	Données.....	109
A.3.2	Plaques de connexion.....	109
A.3.3	Boulons.....	110
A.3.4	Capacité.....	110

---

<b>B</b>	<b>PLANS – ÉTUDE DE CONCEPT</b>	<b>111</b>
<b>C</b>	<b>PLANS – ÉTUDE PRÉLIMINAIRE</b>	<b>147</b>
<b>D</b>	<b>DOCUMENTS POUR LE CN (DVD)</b>	<b>185</b>
D.1	<i>Deck and Ballast Option</i>	
D.2	<i>Abstract</i>	
D.3	<i>Preliminary Study</i>	
D.4	Présentation	
D.5	<i>Project Constraints</i>	
D.6	<i>Recommended solutions</i>	
D.7	<i>Short and Medium Conference – Abstract</i>	
D.8	Groupe de travail	
D.8.1	Documents révisés	
D.8.2	Final Report	
	<b>LISTE DES RÉFÉRENCES</b>	<b>187</b>
	Ouvrage .....	187
	Site web .....	188
	Plan .....	189



# LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 :	Identification des sections d'un chemin de fer.....	xviii
Figure 1.1 :	Produit intérieur brut aux prix de base, certaines industries du transport [Statistique Canada, 2010].....	2
Figure 2.1 :	Traverses en béton bibloc.....	8
Figure 2.2 :	Section transversale d'un pont en bois du CN [CN AA663-116.00-2.01].....	9
Figure 2.3 :	Section transversale d'un pont poutres de 6,8m [CN dessin R1A-14.03].....	10
Figure 2.4 :	Section transversale d'un pont bi-poutres de 14,18m [CN dessin R1A-61.05].....	11
Figure 2.5 :	Section transversale d'un pont bi-poutres de 26,48m [CN dessin R1A-61.09].....	11
Figure 2.6 :	Section longitudinale d'un pont bi-poutres de 27,55m [CN dessin R1A-61.13].....	12
Figure 2.7 :	Section transversale d'un pont à poutres latérales de 25,15m [CN dessin R1A-10.27].....	13
Figure 2.8 :	Section transversale d'un pont à poutres latérales de 14,17m [CN dessin R1A-10.25].....	14
Figure 2.9 :	Sections des éléments d'un pont à treillis fermé du pour diverses portées [CN dessin R1A-341.02].....	15
Figure 2.10 :	Élancement des structures du CN.....	17
Figure 2.11 :	Charge vive - <i>Cooper E80</i> [AREMA, figure 15-1-2].....	19
Figure 2.12 :	Charge vive - Charge alternative de 4 essieux [AREMA, figure 15-1-3].....	19
Figure 2.13 :	Gabarit requis pour le passage d'un train [AREMA, figure 15-1-1].....	20
Figure 2.14 :	Dimensions des rails.....	20
Figure 2.15 :	Types de wagon.....	23
Figure 2.16 :	Grue de type <i>Demag AC 1600</i> .....	24
Figure 2.17 :	Dimensions d'une semi-remorque.....	24
Figure 2.18 :	Système de pont ferroviaire préfabriqué.....	28
Figure 2.19 :	Connexion par boulonnage - Pont <i>Callender Hamilton</i> .....	33
Figure 2.20 :	Connexion par système à goupille - Pont <i>Mabey-Johnson</i> .....	33
Figure 2.21 :	Lancement - Pont <i>Bailey</i> .....	34
Figure 2.22 :	Ponts routiers et ferroviaires – Effort tranchant en fonction de la portée.....	38
Figure 2.23 :	Ponts routiers et ferroviaires - Rapport de l'effort tranchant.....	38
Figure 2.24 :	Ponts routiers et ferroviaires - Moment en fonction de la portée.....	39
Figure 2.25 :	Ponts routiers et ferroviaires - Rapport du moment.....	39
Figure 2.26 :	Limites de flèche pour les vibrations de l'ossature des ponts routiers [Association canadienne de normalisation, 2006].....	40



Figure 3.1 :	Pont poutres - Sections A-A.....	46
Figure 3.2 :	Pont poutres - Sections B-B.....	46
Figure 3.3 :	Pont poutres - Sections C-C.....	47
Figure 3.4 :	Pont à 4 poutres (27,432 m) - Élévation.....	47
Figure 3.5 :	Pont bi-poutres - Sections.....	49
Figure 3.6 :	Pont bi-poutres (27,432 m) - Élévation.....	49
Figure 3.7 :	Pont à poutres latérales - Division de la structure.....	50
Figure 3.8 :	Pont à poutres latérales - Section A-A.....	51
Figure 3.9 :	Pont à poutres latérales - Section B-B.....	51
Figure 3.10 :	Pont à poutres latérales - Section C-C.....	51
Figure 3.11 :	Pont à poutres latérales (27,432 m) - Élévation.....	52
Figure 3.12 :	Pont à poutres latérales (27,432 m) - Vue en plan.....	52
Figure 3.13 :	Pont à 4 poutres et pont à poutres latérales (27,432 m) - Élévation de l'assemblage.....	53
Figure 3.14 :	Pont à 4 poutres et pont à poutres latérales (27,432 m) - Vue en plan de l'assemblage.....	53
Figure 3.15 :	Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Possibilité no.1.....	54
Figure 3.16 :	Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Possibilité no.2.....	55
Figure 3.17 :	Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Possibilité no.3.....	55
Figure 3.18 :	Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Possibilité no.4.....	56
Figure 3.19 :	Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Possibilité no.5.....	56
Figure 3.20 :	Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Section A-A.....	57
Figure 3.21 :	Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Section B-B.....	58
Figure 3.22 :	Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Section C-C.....	59
Figure 3.23 :	Pont à treillis fermé (27,432 m) - Section transversale.....	60
Figure 3.24 :	Pont à treillis fermé (27,432 m) - Vue en plan.....	61
Figure 4.1 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section A.....	67
Figure 4.2 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section A-2.....	68
Figure 4.3 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section B.....	68
Figure 4.4 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section B-2.....	68
Figure 4.5 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section C.....	69
Figure 4.6 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section C-2.....	69
Figure 4.7 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section D.....	69
Figure 4.8 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section D-2.....	70
Figure 4.9 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section D-3.....	70
Figure 4.10 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section E.....	70
Figure 4.11 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section E-2.....	71
Figure 4.12 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section E-3.....	71
Figure 4.13 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section F-2.....	71
Figure 4.14 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section F-3.....	72
Figure 4.15 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section G.....	72
Figure 4.16 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section G-2.....	72
Figure 4.17 :	Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section G-3.....	73
Figure 4.18 :	Pont bi-poutres - Ajustement de la longueur - Section A.....	73
Figure 4.19 :	Types de boulon.....	74
Figure 4.20 :	Pont bi-poutres - Agencement pour une portée de 23 m.....	77

Figure 4.21 :	Pont à poutres latérales - Section transversale.....	78
Figure 4.22 :	Pont à poutres latérales - Sections.....	79
Figure 4.23 :	Pont à poutres latérales - Division de la structure.....	80
Figure 4.24 :	Pont à poutres latérales - Agencement pour une portée de 23 m.....	83
Figure 4.25 :	Pont à treillis latéraux - Élévation du treillis.....	85
Figure 4.26 :	Pont à treillis latéraux - Élévation et section transversale de la section d'extrémité ajustable.....	86
Figure 4.27 :	Pont à treillis latéraux - Système transversal.....	86
Figure 4.28 :	Pont à treillis latéraux - Connexion B.....	88
Figure 4.29 :	Pont à treillis latéraux - Connexion A et C.....	89
Figure 4.30 :	Pont à treillis latéraux - Connexion D.....	89
Figure 4.31 :	Pont à treillis latéraux - Agencement pour une portée de 23 m.....	90
Figure 5.1 :	Dégagement requis pour l'installation des éléments du pont.....	93
Figure 5.2 :	Dimensions des plus grosses sections.....	95
Figure 5.3 :	Poids total de la structure en fonction de sa portée.....	96
Figure 5.4 :	Largeur du pont.....	97
Figure 5.5 :	Nombre de sections en fonction de la portée.....	98
Figure 5.6 :	Temps de boulonnage en fonction de la portée.....	99
Figure A.1 :	Caractéristiques d'un profilé en « I ».....	105
Figure A.2 :	Pont bi-poutres - Dimensions d'une poutre (section A).....	108
Figure A.3 :	Pont bi-poutres - Connexion Z.....	109



# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 :	Types de structures ferroviaires.....	7
Tableau 2.2 :	Caractéristiques des ponts poutres du CN.....	10
Tableau 2.3 :	Caractéristiques des ponts bi-poutres du CN.....	11
Tableau 2.4 :	Caractéristiques des ponts à poutres latérales du CN.....	13
Tableau 2.5 :	Caractéristiques des ponts à treillis fermé du CN.....	17
Tableau 2.6 :	Hauteurs des structures existantes (fournies par le CN).....	22
Tableau 2.7 :	Capacité des wagons.....	23
Tableau 2.8 :	Caractéristiques d'une grue <i>Demag AC 1600</i> .....	24
Tableau 2.9 :	Charge permise par le ministère des Transports du Québec (extrait).....	25
Tableau 2.10 :	Concepts existants de ponts mobiles temporaires.....	27
Tableau 2.11 :	Concepts existants de ponts permanents.....	29
Tableau 2.12 :	Exemples de systèmes modulaires.....	30
Tableau 2.13 :	Exemples de treillis.....	31
Tableau 2.14 :	Exemples de ponts en béton.....	32
Tableau 2.15 :	Comparaison des charges mortes appliquées sur le tablier.....	37
Tableau 2.16 :	Charge admissible pour des connexions « sans glissement » (ksi) [AREMA, 2003, Table 15-9-2].....	41
Tableau 2.17 :	Fatigue des ponts ferroviaires – Classes admissibles en fonction de $F_y$ .....	42
Tableau 2.18 :	Types de portée.....	42
Tableau 2.19 :	Caractéristiques des boulons en fonction de leur diamètre.....	44
Tableau 3.1 :	Pont poutres - Profondeur des poutres principales en fonction de la portée.....	46
Tableau 3.2 :	Étude de concept - Résumé.....	63
Tableau 4.1 :	Pont bi-poutres - Dimensions des plaques pour chaque section.....	67
Tableau 4.2 :	Pont bi-poutres - Sections utilisées pour les raidisseurs et le système transversal.....	74
Tableau 4.3 :	Pont bi-poutres - Plaques et boulons assurant la connexion.....	75
Tableau 4.4 :	Pont bi-poutres - Capacité des connexions.....	75
Tableau 4.5 :	Pont bi-poutres - Agencement en fonction de la portée.....	76
Tableau 4.6 :	Pont bi-poutres - Quantités.....	77
Tableau 4.7 :	Pont bi-poutres - Quantités de matériaux.....	78
Tableau 4.8 :	Pont à poutres latérales - Dimensions des plaques de chaque section.....	80
Tableau 4.9 :	Pont à poutres latérales - Plaques et boulons assurant la connexion.....	81
Tableau 4.10 :	Pont à poutres latérales - Capacité des connexions.....	82
Tableau 4.11 :	Pont à poutres latérales - Agencement en fonction de la portée.....	82
Tableau 4.12 :	Pont à poutres latérales - Quantités.....	83
Tableau 4.13 :	Pont à poutres latérales - Quantités de matériaux.....	83
Tableau 4.14 :	Pont à treillis latéraux - Dimensions des profilés du treillis de 3 m.....	85
Tableau 4.15 :	Pont à treillis latéraux - Plaques de la section d'extrémité.....	86
Tableau 4.16 :	Pont à treillis latéraux - Plaques assurant la connexion du treillis.....	87

Tableau 4.17 :	Pont à treillis latéraux - Boulons assurant la connexion du treillis.....	87
Tableau 4.18 :	Pont à treillis latéraux - Nombre de panneaux à treillis en fonction de la portée.....	90
Tableau 4.19 :	Pont à treillis latéraux - Quantité d'acier de la section transversale.....	91
Tableau 4.20 :	Pont à treillis latéraux - Quantité d'acier de la section d'extrémité.....	91
Tableau 4.21 :	Pont à treillis latéraux - Quantités.....	91
Tableau 4.22 :	Pont à treillis latéraux - Quantités de matériaux.....	91
Tableau 5.1 :	Profondeur maximale requise sous la traverse de bois.....	94
Tableau 5.2 :	Dimensions et poids des plus grosses sections.....	94
Tableau 5.3 :	Quantité totale d'acier.....	94
Tableau 5.4 :	Nombre de sections différentes.....	97
Tableau 5.5 :	Nombre de connexions (cas le plus critique).....	98
Tableau 5.6 :	Temps de boulonnage (cas le plus critique).....	99
Tableau 5.7 :	Comparaison des trois solutions retenues.....	100

# LEXIQUE

Les définitions des termes suivants sont tirées du *grand dictionnaire terminologique* de l'Office québécois de la langue française :

Terme technique	Définition
Ballast	<p>Roche dure généralement concassée, dont les dimensions après criblage, sont comprises entre 4 et 10 cm et destinée à l'infrastructure des voies de chemin de fer.</p> <p>Couche de pierres concassées destinée à l'infrastructure de la voie ferrée (entre les traverses et la plate-forme).</p>
Boulon	<p>Ensemble constitué d'une vis et d'un écrou accompagnés le plus souvent d'une rondelle, qui, après serrage, maintient en contact étroit deux ou plusieurs pièces traversées par la vis.</p> <p>Note : Le boulon comporte toujours une tête. Il traverse les pièces à assembler et les retient ensemble par la pression exercée par sa tête à une extrémité et celle de l'écrou qu'on visse à l'autre extrémité.</p>
Écartement	<p>Distance entre les rails d'une même voie.</p>
Long rail soudé	<p>Barre dont la longueur est suffisante pour qu'un, au moins, de ses points reste fixe, quelles que soient les variations de température.</p>
Plate-forme	<p>Wagon dont le plancher, posé sur le châssis, en fait une simple plate-forme sans caisse ni bord.</p> <p>Wagon sans toit, sans bords latéraux, ou muni de hausses ayant 60 centimètres au maximum.</p> <p>Wagon sans caisse utilisé couramment pour le transport de canalisations, de grumes, de bois d'œuvre et de véhicules lourds.</p>

Rail	<p>Profilé de forme particulière assurant une fonction de support et de guidage.</p> <p>Note : Les rails sont généralement raccordés entre eux par des éclisses boulonnées, mais on utilise de plus en plus les rails soudés. On désigne un rail en donnant son poids en livres par verge : un rail de 90 lb.</p>
Traverse	<p>Chacune des pièces de bois, de fer ou de béton placées en travers de la voie et sur lesquelles les rails sont assujettis.</p>

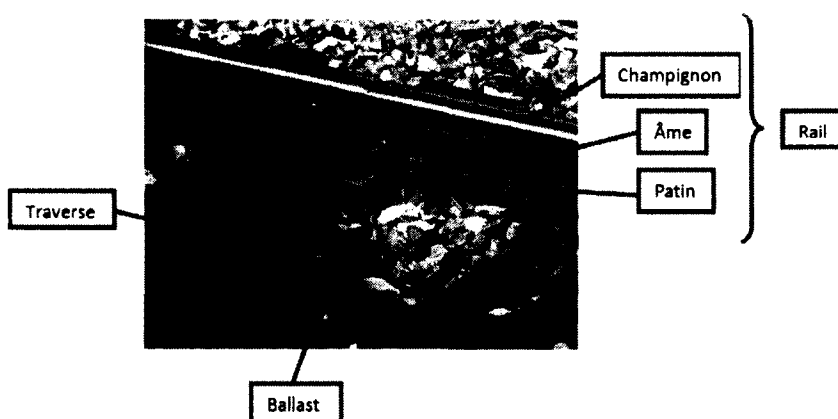


Figure 0.1: Identification des sections d'un chemin de fer

# LISTE DES ACRONYMES

<b>Acronyme</b>	<b>Définition</b>
AREMA	American Engineering and Maintenance-of-Way Association
CN	Canadian National
CP	Canadian Pacific
MTQ	Ministère des Transports du Québec
UdeS	Université de Sherbrooke





# CHAPITRE 1 Introduction

## 1.1 Mise en contexte et problématique

### 1.1.1 Historique des voies ferrées canadiennes

Depuis plusieurs siècles, le transport des marchandises et des voyageurs sur de longues distances représente un défi technologique majeur. La *L&M Railroad* marqua un pas important en inaugurant, en 1830, la première voie ferrée. Située en Angleterre, elle reliait Liverpool à Manchester.

L'année suivante, les Américains inaugurèrent une voie ferrée reliant Albany à Schenectady (New York). Peter McGill (président de la Banque de Montréal) et Jason B. Pierce (de la Nouvelle-Angleterre) furent du premier voyage. À la suite de cette expérience, ils s'associèrent au brasseur John Molson pour réclamer un projet de loi créant la première compagnie de chemin de fer au Canada. Celle-ci fut fondée le 25 février 1832.

Trois ans plus tard, en janvier 1835, les premiers travaux de construction ferroviaire débutèrent au Canada afin de faciliter les échanges commerciaux malgré une géographie vaste et difficile. Deux jeunes ingénieurs américains travaillèrent ainsi à relier Saint-Jean-sur-Richelieu à La Prairie pour permettre un accès rapide au fleuve Saint-Laurent.

Dès le début, l'économie canadienne est affectée positivement par ces travaux : bien que la locomotive à vapeur provienne de Newcastle et les quatre voitures de voyageurs, des États-Unis, c'est à Montréal que les wagons plats et les wagons à bagages ont été construits. En plus de faciliter le transport et les échanges, cette industrie créa de l'emploi au Bas-Canada. L'ouverture officielle de la ligne *Champlain and St.Lawrence Railroad* eut lieu en juillet 1836.

À cette époque, le chemin de fer était trop cher pour expédier des marchandises. Toutefois, pour le transport des voyageurs, il se développa très rapidement. De nombreux chemins de fer locaux virent le jour dans les années qui suivirent. Ce n'est qu'en 1850 que la construction de grandes voies ferrées débuta. Durant de nombreuses années, le domaine ferroviaire domina donc la politique tout en stimulant le commerce, l'industrie et la croissance urbaine. C'est

grâce à cette innovation que le Canada s'est formé en transportant des colons de l'est vers l'ouest.

De 1916 à 1923, le gouvernement canadien a encouragé des centaines d'entreprises ferroviaires, dont la *Grand Trunk Pacific* et la *Canadian Northern*, à se fusionner pour donner naissance à la *Canadian Pacific* (CP) et la *Compagnie des chemins de fer nationaux*. Cette dernière est devenue la *Canadian National Railway* (CN).

Depuis, les méthodes de transport se sont améliorées et le réseau ferroviaire a pris de l'expansion. Ceci a permis d'effectuer de nombreux échanges commerciaux avec les États-Unis et de distribuer de la marchandise à la grandeur du pays.

### 1.1.2 Importance économique du transport ferroviaire au Canada

L'implantation de réseaux de transport a été d'une importance capitale pour l'évolution et l'agrandissement des villes canadiennes. La pérennité de ces réseaux d'importation et d'exportation de marchandises reste encore aujourd'hui nécessaire à l'économie du pays.

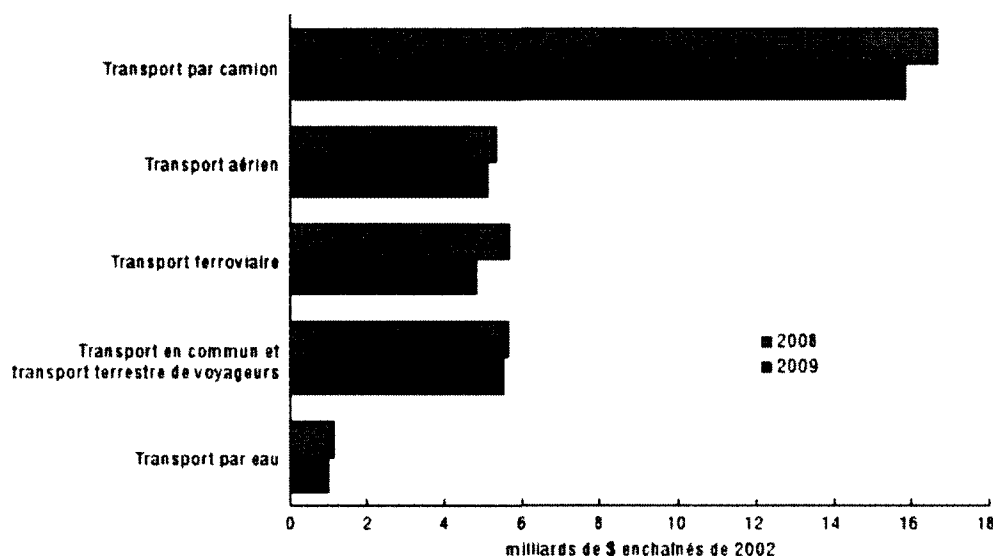


Figure 1.1: Produit intérieur brut aux prix de base, certaines industries du transport [Statistique Canada, 2010]

En observant les données de Statistique Canada, il est possible de constater que le transport ferroviaire demeure l'un des moyens de transport les plus utilisés au Canada (figure 1.1). En 2006, 384,9 millions de dollars américains ont été investis par les divers paliers de gouvernement pour maintenir actif le transport ferroviaire au Canada [Statistiques des

Transports en Amérique du Nord, 2006]. Les gouvernements ont donc, depuis plus d'une quinzaine d'années, réalisé l'importance d'investir dans ce réseau afin de permettre un développement continu du Canada.

### 1.1.3 Pérennité du réseau en cas de rupture d'un ouvrage

Tout comme pour le réseau routier québécois, les ouvrages d'art des réseaux ferroviaires du pays se détériorent peu à peu. La conception de ponts ferroviaires prévoit généralement une durée de vie des ouvrages variant de 50 à 75 ans. Plusieurs ponts ferroviaires termineront donc bientôt leur vie utile. C'est pourquoi, il est nécessaire de les remplacer tout en maintenant actif le réseau du CN. En plus de la détérioration naturelle des structures, certains ponts doivent être remplacés en raison de perturbations humaines (accidents, terrorisme, etc.) ou de désastres naturels (inondation, séisme, glissement de terrain, etc.).

Qu'ils soient dus à l'impossibilité d'utiliser le réseau, à la diminution de la vitesse de transport ou des charges permises, plusieurs inconvénients nuisent actuellement au maintien d'un transport efficace et au respect des horaires. Afin de diminuer les pertes financières causées par une rupture des réseaux ferroviaires, il devient impératif d'élaborer différentes stratégies et technologies pour réhabiliter des ponts qui se détériorent ou sont dysfonctionnels. À première vue, le contournement de la voie ferroviaire pourrait être envisageable. Cependant, une telle opération est extrêmement difficile à planifier et entraîne des coûts supplémentaires. Il devient donc très intéressant de centraliser les travaux de construction à proximité de tels ponts pour diminuer les pertes économiques, les impacts sur l'environnement et les conséquences négatives pour les utilisateurs du réseau. De plus, une telle façon de procéder favorise la sécurité des usagers et celle des ouvriers.

En Amérique du Nord, la population est de faible densité et répartie de façon inégale sur le vaste territoire. Le réseau ferroviaire comprend donc souvent une seule voie entre deux destinations; ce qui rend impossible la déviation temporaire de ce trafic. En situation d'urgence, la rapidité de réhabilitation et de reconstruction des ponts ferroviaires devient ainsi déterminante au niveau économique. Il a été estimé que chaque heure d'interruption du réseau entraîne une perte variant de 50 000\$ à 100 000\$ pour la compagnie ferroviaire concernée

[Freeby et coll., 2007]. Les pertes associées au remplacement d'un pont représente donc entre 1,2M\$ et 2,4M\$ par jour.

#### 1.1.4 Solution existante au CN

Pour limiter les coûts d'interruption du réseau, le CN utilise actuellement des poutres « d'urgence » de diverses longueurs, entreposées un peu partout au Canada. Cette façon de faire nécessite le maintien d'un grand inventaire de poutres, en plus d'être complexe au niveau du transport, de l'érection et du démantèlement. En plus d'être dispendieuse et de perturber le trafic et l'environnement, celle-ci requiert plusieurs heures de mise en place. Ces coûts importants pourraient être limités grâce à l'utilisation d'un pont mobile ferroviaire.

Le projet de cette étude permettra d'améliorer la situation en fournissant des informations pratiques et adaptées à la construction de ponts ferroviaires mobiles. L'utilisation de tels ponts réduira considérablement l'inventaire des poutres « d'urgence » entreposées, accélèrera le remplacement de tabliers et rendra la zone des travaux de construction plus sécuritaire. En plus de maintenir le trafic ferroviaire, ce procédé diminuera l'impact de tels travaux sur l'environnement, les coûts de construction ainsi que les conséquences économiques de l'interruption du réseau.

### 1.2 Définition du projet de recherche

Puisque l'ensemble du territoire du CN est réparti des Territoires du Nord-Ouest au Mexique et s'étend de la Colombie-Britannique à la Nouvelle-Écosse, le concept de pont ferroviaire mobile devra considérer toutes les contraintes climatiques (exemples : grandes charges de neige au nord, séismes au sud, grands vents à proximité des côtes, etc.). De plus, les sections du pont mobile devront être entreposables et réutilisables pour des portées et hauteurs d'appui variables. Elles seront transportées au chantier sur des wagons plats (*flat car*), des wagons plats à parois de bout (*bulkhead flat car*) ou des camions semi-remorque standards. Une grue de type *Demag AC 1600* servira à leur mise en place.

Avec toutes ces contraintes, sera-t-il possible de développer un concept de pont ferroviaire mobile qui soit conforme aux normes du CN et de l'*American Engineering and Maintenance-of-Way Association* (AREMA), qui ait une durée de vie de 50 ans et qui puisse être entretenu

adéquatement entre ses utilisations? Afin d'augmenter la rapidité de construction, le ballast, généralement utilisé pour limiter les vibrations des rails et pour l'entretien des voies, pourra-t-il être remplacé par un autre procédé?

### 1.3 Objectifs

L'objectif général de ce projet est de développer un concept de pont ferroviaire mobile qui puisse être entreposé et utilisé sur l'ensemble du réseau du CN. Pour ce faire, le projet devra répondre à de nombreux critères (charges, connexions, transport, érection). Ceux-ci seront détaillés davantage au chapitre 2.

Plusieurs concepts de ponts mobiles piétonniers et routiers existent actuellement. Les militaires ainsi que différentes associations de transport ont élaboré leur propre concept de pont préfabriqué. Bien que ces innovations ne soient pas toutes réutilisables, leur adaptabilité au domaine ferroviaire (charge mobile, portée simple et vibration plus importante) sera analysée.

Afin de diminuer les coûts et l'entretien des structures, il faudra également évaluer les différents types de matériaux et choisir celui qui est le plus adéquat pour ce type d'ouvrage d'art. Les quantités de matériaux entreposés seront elles aussi analysées.

Créer un concept de pont mobile n'est pas le seul défi qui sera relevé. Il faudra également que celui-ci soit mis en place en utilisant des techniques de construction sécuritaires et rapides. Lors du développement de ce concept, il faudra analyser les méthodes de construction qui ont été utilisées au cours des dernières années afin de déterminer laquelle est la plus appropriée pour ce type de projet.

Puis, la conception de ce type de pont sera réalisée (conception et plans préliminaires), permettant ainsi au CN de passer en phase définitive pour créer un prototype de pont ferroviaire mobile et l'expérimenter sur son réseau. Les résultats obtenus seront également publiés pour permettre l'avancement des technologies dans ce domaine.

## 1.4 Contributions originales

Bien que plusieurs types de ponts piétonniers, routiers et militaires soient actuellement conçus pour être mis en place dans un délai restreint, il n'en est rien au niveau ferroviaire. Les charges ferroviaires étant supérieures à celle des camions ou des véhicules militaires, il est impossible d'utiliser les structures existantes. L'analyse de celles-ci sera donc effectuée afin d'en faire ressortir les caractéristiques principales. Un concept sera ensuite mis de l'avant afin de créer un pont ferroviaire mobile qui peut facilement être mis en place en moins de 24 heures. Des sections modulaires seront élaborées et la dimension des sections à pré-assembler sera fixée en fonction de la capacité d'un camion semi-remorque standard, des wagons et de la grue disponibles pour le transport et l'érection de la structure. La non-utilisation de ballast sur cet ouvrage temporaire sera également évaluée.

## 1.5 Plan du document

Le présent document regroupe différentes solutions de pont mobile utilisées par le passé pour les domaines piétonniers, routiers et militaires. En plus des normes et guides utilisées, les diverses contraintes de conception, de mise en place et d'utilisation des structures y sont énumérées. Une brève comparaison entre les concepts de ponts ferroviaires et routiers permet de faire ressortir les caractéristiques nécessaires à l'élaboration du concept. Les 5 types de ponts ferroviaires existants y sont modifiés avant d'illustrer plus en détail les 3 types qui seront retenus pour le projet. Finalement, une analyse multicritères est effectuée pour obtenir la solution la plus adéquate pour respecter les critères du CN.

## CHAPITRE 2 ÉTAT DES CONNAISSANCES

L'élaboration d'un concept de pont ferroviaire mobile exige d'abord une analyse de l'état des connaissances sur les divers types d'ouvrage d'art. Il est ainsi souhaitable d'analyser les structures ferroviaires existantes. Le maintien de la circulation et la rapidité d'exécution étant des préoccupations majeures durant la réalisation des travaux de construction ou de réhabilitation d'un ouvrage, les méthodes de construction sont également considérées dans le processus de conception. Plusieurs concepts de ponts routiers transportables et à construction rapide sont présentement utilisés sur le réseau routier ou pour des ouvrages piétonniers; en analysant les différences entre les domaines ferroviaire et routier, il est possible de définir comment ces concepts peuvent être adaptés aux réseaux ferroviaires. Finalement, ce chapitre présente les critères de conception à considérer pour le développement d'un concept de pont ferroviaire mobile. Ces derniers ont été établis avec la collaboration du CN.

### 2.1 Ponts ferroviaires

Les structures ferroviaires peuvent se regrouper en trois groupes selon la longueur de leur portée [Chen, 2000]. Le tableau 2.1 définit le type de structure généralement utilisé pour chacune de ces longueurs.

Tableau 2.1: Types de structure ferroviaire

Portée		Type de pont
Petite portée	Jusqu'à 4,9m (16pi)	Longerons de bois
		Tablier de béton
		Poutres d'acier
	Jusqu'à 9,8m (32pi)	Poutres-caissons en béton conventionnel ou précontraint
		Poutres d'acier
	Jusqu'à 15,2m (50pi)	Poutres-caissons en béton précontraint Poutres d'acier, tablier et tablier ouvert à poutres
Moyenne portée	24,4m (80pi) à 38,1m (125pi)	Poutres de béton précontraint
		Tablier et tablier ouvert à poutres
Grande portée	-	Tablier et tablier ouvert à treillis (simple, cantilever et arches)



La superstructure des ponts ferroviaires est généralement recouverte de ballast et de traverses de bois sur lesquelles sont fixés les rails. L'utilisation du ballast a deux avantages : au niveau de l'entretien, le ballast permet de contrôler facilement le profil du tracé ferroviaire alors qu'au niveau dynamique, il permet de mieux contrôler la vibration en apportant un bon amortissement et plus de poids sur la structure.

En examinant les réseaux ferroviaires existant à travers le monde, il est possible de constater que leurs composantes peuvent être modifiées. Ainsi, tel qu'illustré à la figure 2.1, les Français ont remplacé, à divers endroits sur leur réseau, le ballast et les traverses de bois par des traverses en béton bibloc [Réseau ferré de France, 2007].



Figure 2.1: Traverses en béton bibloc

### 2.1.1 Structures du CN

En étudiant plus particulièrement le réseau du CN, il est possible de constater que cette entreprise possède plusieurs structures en acier. Cinq types de pont se retrouvent principalement sur ce réseau: les ponts (a) poutres (*Beam Span*), (b) bi-poutres (*Plate Girder*), (c) à poutres latérales (*Through Girder*), (d) à treillis latéraux (*Through Truss*), et (e) à treillis fermé (*Truss Girder*). Quant aux ouvrages en béton, ce sont les structures à poutres-caissons conventionnelles qui sont généralement utilisées. Qu'ils soient en acier ou en béton, tous les ponts sont constitués d'un tablier recouvert de 152,4mm (6po) de ballast et de traverses de bois.

Certaines constructions plus anciennes ont également été construites en bois. Toutefois, l'entreprise tend actuellement à remplacer ce type d'ouvrage. La figure 2.2 illustre un exemple de pont en bois.

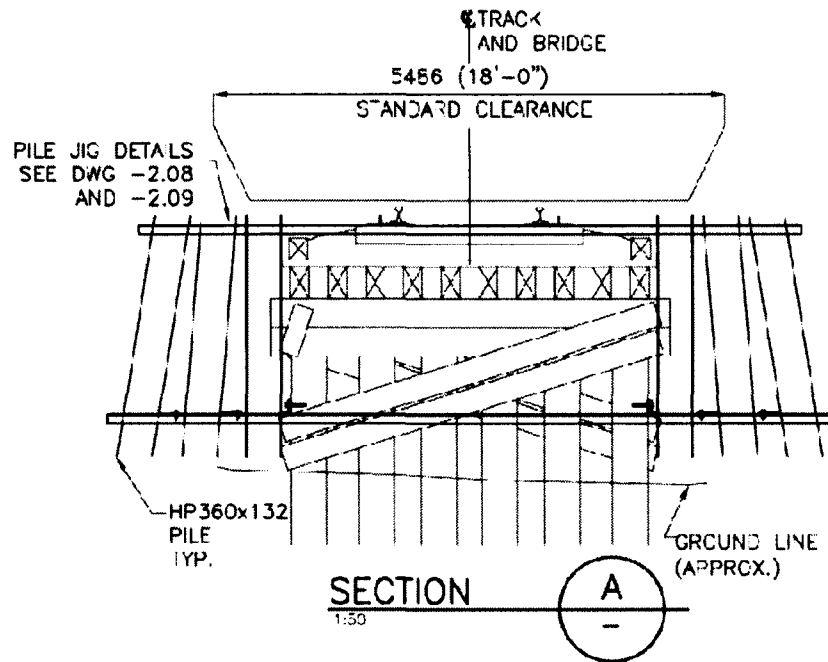


Figure 2.2: Section transversale d'un pont en bois du CN [CN AA663-116.00-2.01]

La présente section décrit chaque type de ponts en acier utilisé par le CN. Pour faciliter leur comparaison, un tableau regroupant leurs caractéristiques principales et une section transversale, extraite des plans du CN, y sont ensuite présentés.

### Pont poutres

Tel qu'illustré à la figure 2.3, les ponts poutres du CN sont constitués d'une dalle fermée reposant sur des poutres longitudinales. Ces dernières sont maintenues latéralement par des poutres transversales (profilé en « I ») ou des cornières fixées en forme de « X ». Le contreventement utilisé dépend de la hauteur des poutres qui, elle, est associée à la portée. Toutes les connexions sont boulonnées, assurant ainsi une bonne résistance à la fatigue causée par la vibration due au passage des trains. Le tableau 2.2 résume les caractéristiques de ce type de pont.



Tableau 2.3 : Caractéristiques des ponts bi-poutres du CN

Connexion des rails	Traverses de bois
Type de dalle	Dalle de béton avec ballast
Nombres de poutres	2
Emplacement des poutres	Sous la dalle
Hauteur des poutres	Entre 0,5 et 2,5m
Connexions	Éléments soudés assemblés par boulonnage
Contreventement latéral	Poutre transversale (profilé en « I ») ou cornières en « X »

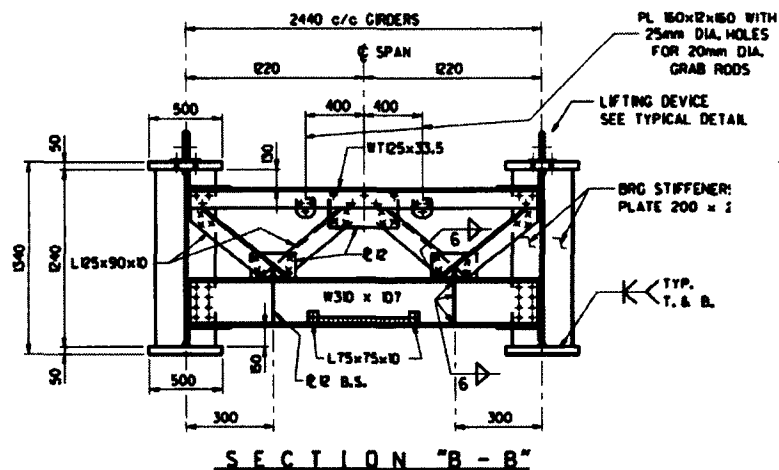


Figure 2.4: Section transversale d'un pont bi-poutres de 14,18m [CN Dessin R1A-61.05]

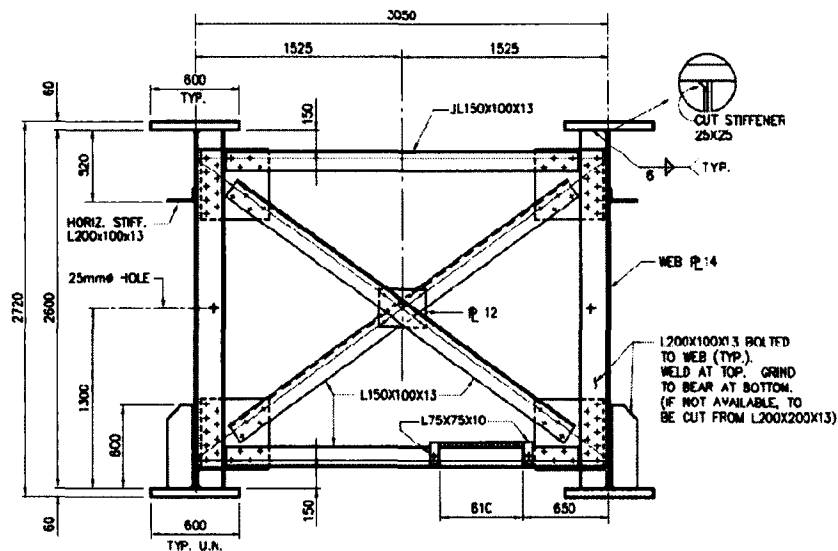
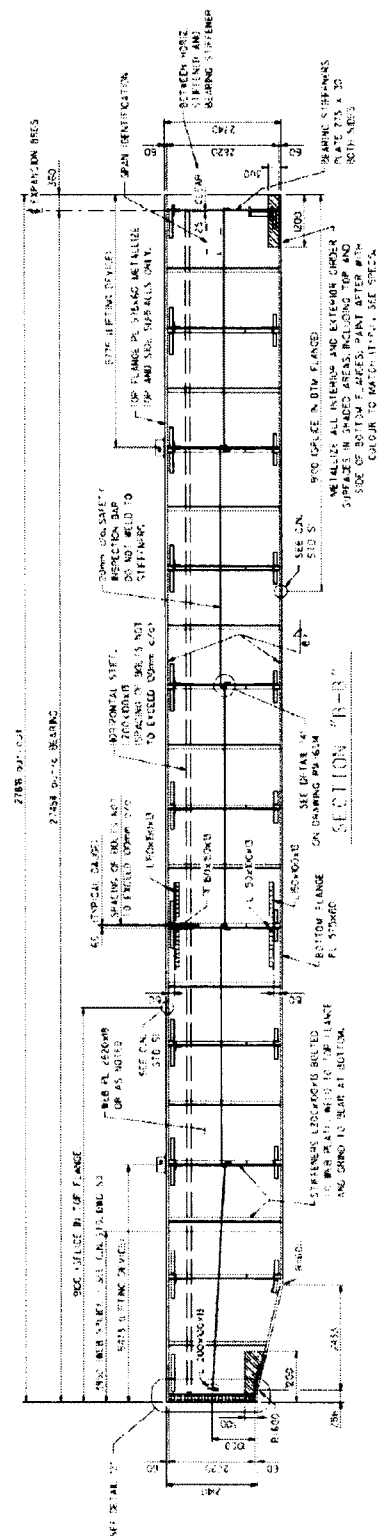


Figure 2.5: Section transversale d'un pont bi-poutres de 26,48m [CN Dessin R1A-61.09]



**Figure 2.6: Section longitudinale d'un pont bi-poutres de 27,55m [CN Dessin R1A-61.13]**

### Pont à poutres latérales

Les ponts à poutres latérales sont également constitués de deux poutres longitudinales. Celles-ci sont toutefois situées de part et d'autre de la dalle fermée. Ce type d'assemblage nécessite un plus grand espace latéral, mais permet d'obtenir un plus grand dégagement sous le pont. Les poutres transversales permettent de supporter la dalle recouverte de ballast. Les cornières installées en angle sur ces poutres transversales assurent la stabilité latérale des poutres latérales. Le tableau 2.4 présente les caractéristiques de ce type de pont alors que les figures 2.7 et 2.8 illustrent des exemples de sections transversales.

Tableau 2.4 : Caractéristiques des ponts à poutres latérales du CN

Connexion rails	Traverses de bois
Type de dalle	Dalle de béton ou d'acier avec ballast
Nombres de poutres	2
Emplacement des poutres	De part et d'autre de la dalle
Hauteur des poutres	Entre 1,0 et 3,5m
Connexions	Éléments soudés assemblés par boulonnage
Stabilité latérale	Raidisseurs en angle

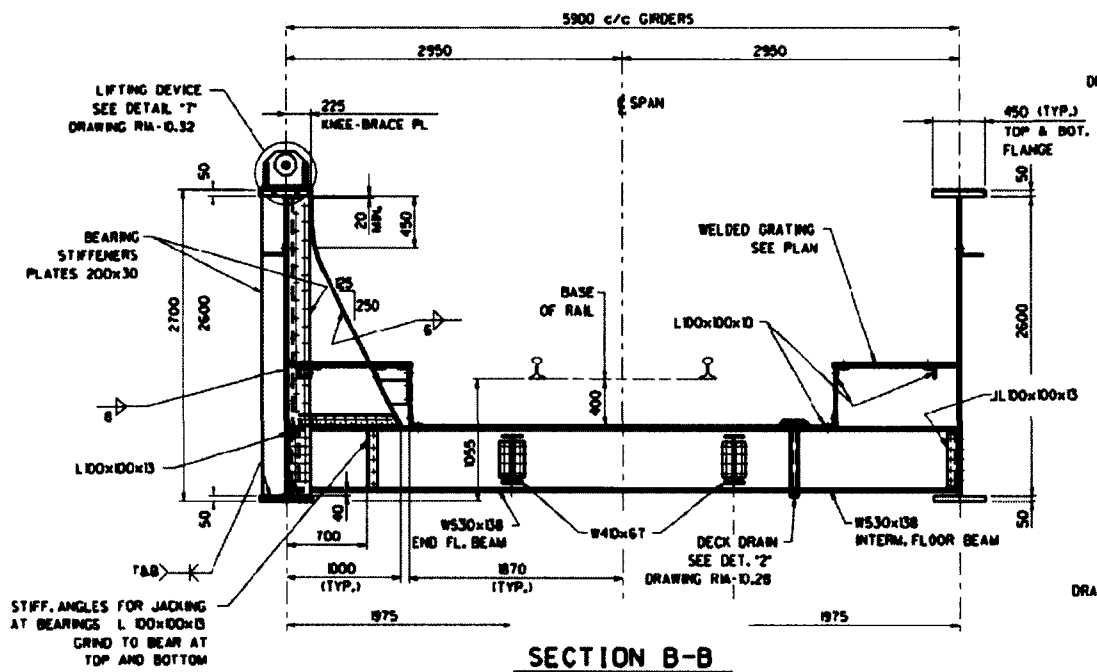


Figure 2.7: Section transversale d'un pont à poutres latérales de 25,15m [CN dessin R1A-10.27]









Tableau 2.5: Caractéristiques des ponts à treillis fermé du CN

<b>Connexion des rails</b>	Traverses de bois
<b>Type de dalle</b>	Dalle de béton ou d'acier avec ballast
<b>Nombres de treillis</b>	4
<b>Emplacement des treillis</b>	Tout autour
<b>Hauteur des treillis latéraux</b>	Environ 11,0m (36pi)
<b>Connexions</b>	Éléments soudés assemblés par boulonnage
<b>Stabilité latérale</b>	Concept d'une boîte

### Comparaison

Bien que le CN utilise différents types de structure, ceux-ci correspondent à des longueurs de portée définies. Tel que montré à la figure 2.10, l'élancement des structures est également différent d'un type de pont à l'autre, et ce, en fonction de la portée.

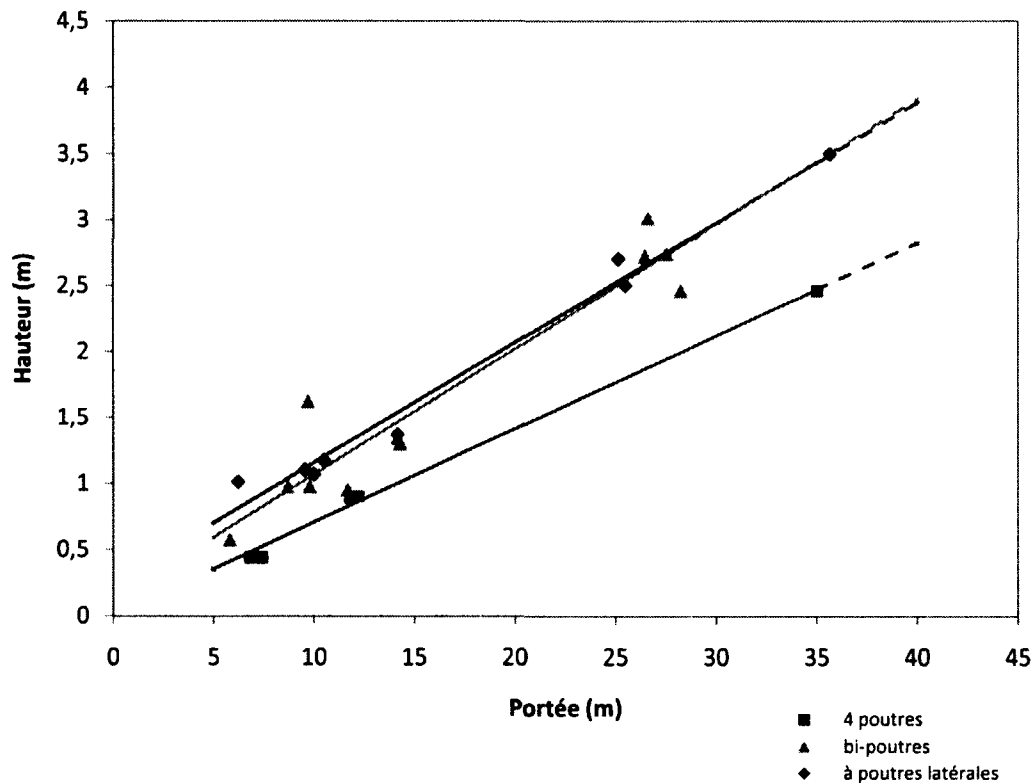


Figure 2.10: Élancement des structures du CN

Ainsi, un pont poutres est préférentiellement utilisé pour de courtes portées. Les ponts bi-poutres et à poutres latérales sont adéquats pour l'ensemble des portées. Toutefois, le dégagement vertical sous l'ouvrage dicte généralement le choix du type de structure.

### 2.1.2 Critères de conception des ponts ferroviaires

#### Normes et guides

Les normes utilisées pour la conception des ouvrages d'art sont différentes selon le type de pont projeté. Ainsi, l'*AREMA, Manual for Railway Engineering* [AREMA, 2003] est la norme utilisée en Amérique pour réaliser la conception des ponts ferroviaires alors que la norme canadienne *CAN/CSA-S6-06* [Association canadienne de normalisation, 2006] est réservée à l'ensemble des structures routières. Il est important de noter que ces deux normes sont très différentes puisque l'*AREMA* exige des calculs aux contraintes admissibles alors que, pour la *CAN/CSA-S6-06*, ce sont des calculs aux états limites.

Le *Guidelines for Design of Railway Structures 2006* [Canadian National Railway, 2006b] précise comment appliquer les exigences de l'*AREMA* aux structures du CN. Ce document définit les types de plan à fournir pour la construction, les caractéristiques des matériaux à utiliser, etc.

Le CN a également élaboré la *Norme de la voie* [Canadian National Railway, 2006c] qui permet aux concepteurs d'avoir à leur disposition les caractéristiques relatives à son réseau telles que : la largeur des rails, le dégagement nécessaire pour le transport, la longueur de rail requise pour compléter l'approche de la structure, etc.

#### Charges

##### Charge morte

Les masses volumiques à considérer pour la charge morte (rails, ballast, traverses, béton de dalle, garde-corps, etc.) sont inscrites dans le tableau 15-1-5 de la norme *AREMA*.

##### Charge vive

Tel qu'indiqué dans l'*AREMA*, les charges sont réparties sur les essieux d'une locomotive *Cooper E80*, aux endroits indiqués à la figure 2.11. Une charge alternative, telle que présentée à la figure 2.12, doit également être considérée lors de la conception. Des deux situations, les efforts maximaux doivent être retenus.

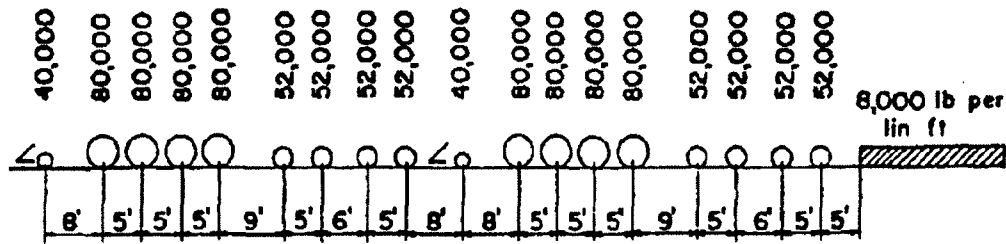


Figure 2.11: Charge vive - Cooper E80 [AREMA, figure 15-1-2]

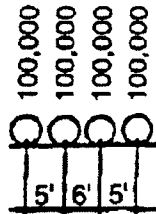


Figure 2.12: Charge vive - Charge alternative de 4 essieux [AREMA, figure 15-1-3]

### Flèche

Pour une longueur de portée  $L$ , une flèche maximale de  $L/640$  est permise longitudinalement alors que, latéralement, un maximum de 9,5mm (3/8po) est toléré.

### Autres

La charge due à un impact, celle de vent et la charge longitudinale causée par le freinage ou les forces de traction sont calculées tel qu'indiqué au chapitre 15 de la norme AREMA.

### Gabarit et dégagement vertical

La figure 2.13 illustre les dimensions requises pour le transport ferroviaire. Ainsi, aucun élément du pont ne doit se situer à l'intérieur de ce gabarit.

De plus, les dimensions nécessaires pour une seule voie doivent être considérées. Un dégagement vertical minimum de 5,3m (17pi-4½po) ou de 0,924m (3pi-3/8po) sous le pont doit respectivement permettre la circulation routière ou maritime. Ces gabarits sous ouvrage ne sont pas considérés dans cette étude.



### 2.1.3 Contraintes spécifiques pour les ponts ferroviaires mobiles

En plus de devoir respecter les exigences des normes et guides énumérés à la section 2.1.2, le CN définit quelques caractéristiques qui doivent être respectées afin que le projet soit adapté à son réseau.

#### **Type de pont**

L'ouvrage doit être conçu pour une durée de vie de 50 ans et sera érigé au même endroit pour une durée maximale d'un an. Puisque ce type de pont d'urgence est érigé et démantelé plusieurs fois, il sera plus facile de réaliser certaines activités de maintenance entre les utilisations. Le pont est conçu pour 20 utilisations (érection et démantèlement).

#### **Géométrie**

Les portées des ouvrages à remplacer sont comprises entre 5,0m et 28,0m et devront être considérées lors de la conception de ce type de pont. De plus, afin de pouvoir conserver les fondations actuelles, les sections d'extrémité doivent être ajustables au 0,305m, 0,610m et 1,220m (1pi, 2pi et 4pi). Des hauteurs d'appui variables sont également à considérer. Le tableau 2.6 énumère les hauteurs d'appui les plus courantes utilisées présentement sur le réseau du CN. Pour les fins de ce projet, le pont doit être droit et sans biais. Sa largeur doit permettre le passage d'un train au minimum. Aucun refuge, garde-corps ou zone piétonnière n'est nécessaire sur ce type d'ouvrage.

#### **Charges**

Bien que la majorité des structures actuellement en phase de conception puisse résister aux charges d'une locomotive *Cooper E90*, les charges vives exigées dans l'*AREMA* sont suffisantes pour un pont temporaire. Une locomotive *Cooper E80* doit donc être considérée.

#### **Connexions**

Le CN exige que toutes les connexions sur son réseau soient boulonnées, à l'exception de celles situées entre les semelles et l'âme des poutres maîtresses. Ces dernières doivent être soudées (pleine pénétration). De plus, pour estimer les délais de construction, il est possible de considérer qu'un ouvrier met en place environ 40 boulons en une heure.

Tableau 2.6: Hauteurs des structures existantes (fournies par le CN)

B/R= base of rail  
Brg= bearing

Ref Dwg No	Span Type	Length (mm)	No of Girders	Depth Girder (mm)	B/R - Top/Brg (mm)
R1A-14.02	Beam	6430	4	550	825
R1A-14.03	Beam	6800	4	440	715
R1A-14.07	Beam	7800	4	440	715
R1A-14.12	Beam	7920	4	740	1015
R1A-14.20	Beam	10360	4	680	955
R1A-14.10	Beam	11800	4	890	1165
R1A-14.11	Beam	12200	4	900	1175
R1A-15.02	Beam	35040	4	2460	2735
R1A-61.24	DPG	5800	2	575	900
R1A-61.26	DPG	9080	2	975	1300
R1A-61.01	DPG	9700	2	900	1175
R1A-61.02	DPG	9720	2	1620	1945
R1A-61.18	DPG	10200	2	975	1300
R1A-61.04	DPG	11680	2	950	1275
R1A-61.05	DPG	14180	2	1340	1665
R1A-61.22	DPG	14250	2	2300	2625
R1A-61.07	DPG	14300	2	1300	1625
R1A-61.09	DPG	26480	2	2700	3025
R1A-61.11	DPG	26600	2	3010	3335
R1A-61.13	DPG	27450	2	2740	3065
R1A-61.16	DPG	28260	2	2460	2785
R1A-61.20	DPG	28520	2	2800	3125
				Top/Brg - U/S Tie	
R1A-10.34	TPG	6200	2	486	811
R1A-10.23	TPG	9540	2	536	861
R1A-10.36	TPG	10000	2	504	829
R1A-10.39	TPG	10500	2	616	941
R1A-10.25	TPG	14170	2	585	910
R1A-10.27	TPG	25150	2	655	980
R1A-10.29	TPG	25500	2	654	979
R1A-10.31	TPG	35650	2	639	964
R1A-10.43	TPG	35650	2	639	964

### Rails et traverses

Une seule voie est requise pour permettre le bon fonctionnement du réseau du CN. Cette voie doit être constituée de rails réguliers et de traverses de bois régulières.

### Appuis, piliers et culées

Les fondations existantes seront utilisées lors de la mise en place de l'ouvrage. Si les appareils d'appui de celles-ci sont endommagés, ils seront remplacés par un appui en élastomère fretté ayant une profondeur de 25mm. Le pont temporaire devra être ajustable afin qu'il puisse s'adapter aux diverses hauteurs d'appui. Celles-ci sont indiquées dans le tableau 2.6 transmis par le CN. Quant aux culées, elles seront également conservées. Des modifications mineures pourront leur être apportées afin d'y connecter adéquatement la nouvelle superstructure.

### Transport, érection et démantèlement

Afin de minimiser les délais de construction, les sections seront transportées par des wagons jusqu'au site où une grue servira à leur mise en place. Les figures 2.15 et 2.16 illustrent respectivement les types de wagon [Canadian National Railway] et de grue [Ray Anthony intl.] qui seront utilisés. Les tableaux 2.7 et 2.8 présentent leurs capacités.



**Wagon plat avec parois de bout**  
(Bulkhead flat car)



**Wagon plat**  
(Flat car)

Figure 2.15: Types de wagon

Tableau 2.7: Capacité des wagons

Type de wagon	Série	Charge tonne	Dimensions du chargement		
			Longueur intérieure	Largeur extérieure	Hauteur extérieure
Plat avec parois de bout	CN/DWC 606078-609187	71 à 74	15,7m (51pi-6po)	3,2m (10pi-8po)	4,5m (14pi-9po)
	CN 610400-610479	71 à 74	15,7m (51pi-6po)	3,2m (10pi-8po)	4,5m (14pi-9po)
	CNIS 621007-622678	81 à 85	20,1 à 20,3m (66pi à 66pi-8po)	3,1m (10pi-1po à 10pi-2po)	4,6m (15pi-1po à 15pi-2po)
Plat	CN 639850-639999	82	27,2m (89pi-4po)	2,3m (9pi-6po)	-
	CN 668000-668299	82	27,2m (89pi-4po)	2,3m (9pi-6po)	-
	IC/ICG 907550-907584	70	17,5m (57pi-6po)	3,2m (10pi-7po)	-
	IC/ICG 910025-910346	67 à 70	18,3m (60pi)	3,2m (10pi-8po)	-



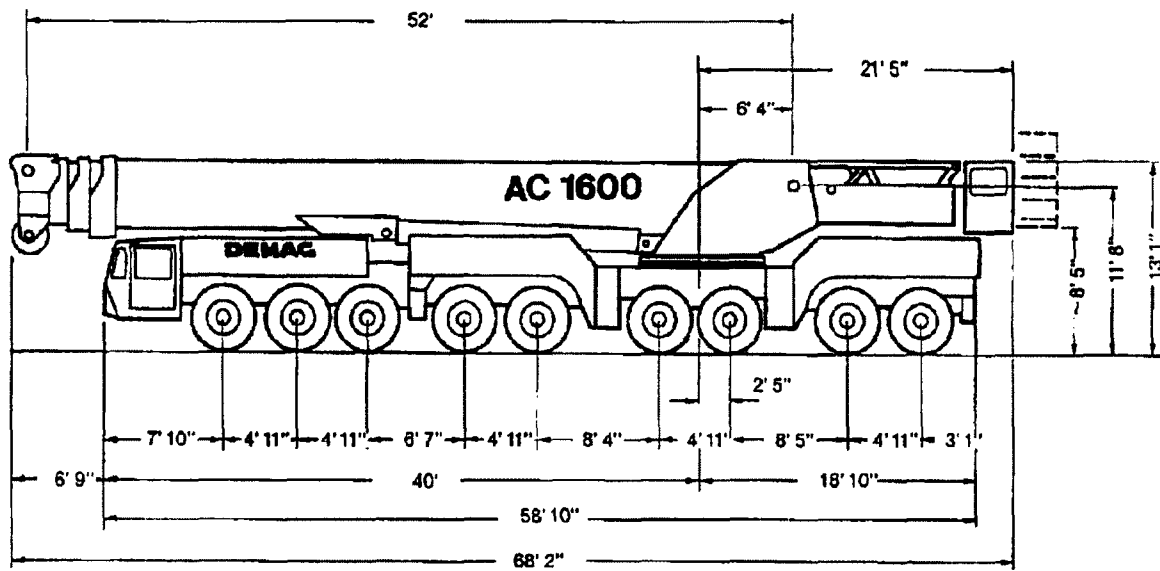


Figure 2.16: Grue de type Demag AC 1600

Tableau 2.8: Caractéristiques d'une grue Demag AC 1600

Angle	360°
Charge maximale	650 tonnes
Distance maximale de levage	50m (164pi)
Distance maximale avec une rallonge	118m (387pi)

Toutefois, dans certains cas, des camions semi-remorque réguliers pourront également être utilisés pour le transport des matériaux. Les dimensions des sections du tablier sont donc définies par celles de la remorque (catégorie B.45) : au maximum, 2,5m de largeur, 15,5m de longueur et 3m de hauteur. Elles sont représentées à la figure 2.17 [Ministère des Transports du Québec, 2004b].

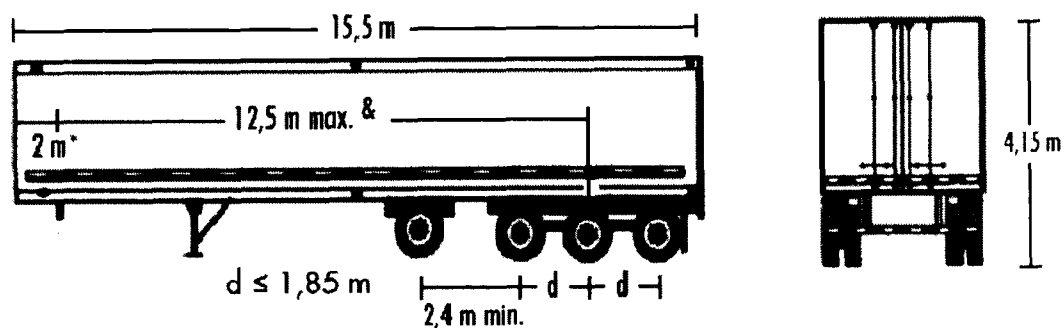



Figure 2.17: Dimensions d'une semi-remorque

De plus, le gouvernement provincial restreint le poids de la marchandise transportée sur son réseau routier. Tel qu'indiqué au tableau 2.9, la charge maximale permise par le ministère des Transports Québec est de 32 000 kg pour une période normale, alors qu'elle est de 27 500 kg en période de dégel [ministère des Transports du Québec, 2004b]. En plus de la dimension des sections, leur poids devra donc être considéré lors de l'élaboration de la méthode de construction.

Tableau 2.9: Charge permise par le ministère des Transports du Québec (extrait)

CATEGORIE	DESCRIPTION	PERIODE NORMALE	PERIODE DE DEGEL
B.45	Un essieu autoporteur <sup>1</sup> à l'avant d'un essieu triple  $b \geq 2,4 \text{ m}$ $3,6 \text{ m} \leq c \leq 3,7 \text{ m}$	32 000 kg <sup>1</sup>	27 500 kg <sup>1</sup>

## 2.2 Ponts transportables et ponts à construction rapide

Depuis quelques années, de nombreuses études ont porté sur les procédés et les techniques de remplacement de ponts autoroutiers en situation d'urgence. Bien que les solutions proposées soient encore à améliorer, plusieurs conclusions intéressantes sont déjà observées [Bai et Burkett, 2006] : (a) lors d'une situation d'urgence, la rapidité de réaction est la clé pour atténuer les pertes financières et les désagréments des usagers; (b) l'utilisation d'éléments préfabriqués ou modulaires accélère le début des travaux en raison des courts délais de production et de transport; (c) l'existence de techniques de construction qui permettent de limiter les inconvénients ressentis par les utilisateurs (diminution de la vitesse de transport, par exemple) et des résidents à proximité des travaux de remplacement; et (d) l'utilisation de techniques de construction rapide, les horaires de travail et l'utilisation de matériaux nouveaux et innovateurs diminuent considérablement les délais de construction. La recherche de nouvelles techniques et procédés de construction s'avère donc essentielle pour améliorer les conditions de réhabilitation et de reconstruction de ces structures.

L'Europe, les États-Unis et le Japon sont les pionniers du développement de méthodes permettant d'accélérer la construction de ponts autoroutiers. Quelques-uns de leurs procédés peuvent également être utilisés pour la construction de ponts mobiles. Les analyses concernant la construction efficace d'une structure mobile recommandent de : (a) établir une base de

données afin de connaître les caractéristiques des diverses structures (autoroutes et ponts) constituant le réseau; (b) développer et utiliser des détails de connexion et des joints rapidement assemblables, durables et facilement réparables; (c) identifier le type de transport, d'érection et de démantèlement (incluant les équipements et leurs charges admissibles) qui pourront être utilisés; (d) utiliser des méthodes de construction innovatrices; et (e) favoriser l'utilisation de matériaux nouveaux dans le domaine, en tenant compte de leur performance, leur durabilité et leur poids.

Historiquement, le premier système de pont temporaire a été créé pour les militaires britanniques dans les années 30. Celui-ci était constitué de sections préfabriquées en acier. Par la suite, plusieurs modèles de ponts permanents et temporaires ont été élaborés. Chaque concept, d'abord conçu pour un projet précis, a été amélioré et adapté, avec les années, laissant ainsi place à de nouveaux concepts. Tous ces modèles se subdivisent en deux grandes catégories : (a) les ponts temporaires, et (b) les ponts permanents [Annexe D.1.2]. Certaines compagnies ont également développé des plans d'intervention d'urgence adaptés spécifiquement à leurs structures.

### **Ponts temporaires**

Les ponts temporaires sont généralement conçus à l'aide de panneaux préfabriqués, de poutres ou de divers systèmes de tablier. Certains types de pont à treillis servent également de ponts temporaires. Depuis les années 30, plusieurs concepts ont été élaborés : (a) *Hamilton*, (b) *Bailey*, (c) *Acrow*, (d) *Mabey*, (e) *Janson*, (f) *Quadricon*, (g) *AASHTO-TIG*, (h) *Fort Miller*, (i) *BIG R Manufacturing*, (j) *Steadfast*, (k) *U.S.*, et (l) *U.S. Military*. Le tableau 2.10 présente les principales caractéristiques de ces ponts temporaires.

Tableau 2.10 : Concepts existants de ponts mobiles temporaires

Année	Concept	Matériau	Portée max m	Largeur du module m	Nombre de voies	Type d'érection	Charge de conception
	<i>Hamilton</i>	Acier	27,43	4,88		Lancement en cantilever ou levée à la grue	<i>AASHTO HS25</i>
1943	<i>Bailey</i>	Acier	57,91	4,34	1	Lancement en cantilever ou levée à la grue	<i>AASHTO HS15-44</i>
1973	<i>Acrow panel</i>	Acier	76,20	3,66	1-3	Lancement en cantilever ou levée à la grue	<i>AASHTO HS25-44</i>
	<i>Acrow swift beam</i>	Acier	21,34	3,35-6,40		Levée à la grue	1 véhicule (35 tonnes)
1987	<i>Mabey panel</i>	Acier	91,44	4,27	1-4	Lancement en cantilever ou levée à la grue	<i>AASHTO HS25-44</i> ou <i>MS 250</i>
	<i>Mabey quick</i>	Acier	6,10 9,14 12,19	1,75		Levée à la grue	<i>AASHTO HS25-44</i>
	<i>Janson</i>	Acier				Levée à la grue	
	<i>Quadricon</i>	Acier					
	<i>AASHTO-TIG</i>						
	<i>Fort Miller</i>	Composite	30,48	Variée	Varié	Levée à la grue	Variée
	<i>Big R Manufacturing</i>	Acier	27,43	2,13-2,44 (max 8,53)		Levée à la grue	<i>AASHTO HS20-44</i>
	<i>Steadfast</i>	Acier	45,72	3,66-12,19		Lancement en cantilever ou levée à la grue	<i>AASHTO HS20</i> et <i>HS25</i>
1936	<i>U.S. Truss</i>	Acier	42,67		1-3	Lancement en cantilever ou levée à la grue	<i>AASHTO HS20</i> et <i>HS25</i>
	<i>U.S. Beam</i>	Acier	18,29		1-3	Levée à la grue	<i>AASHTO HS20</i> et <i>HS25</i>
1999	<i>Military dry support</i>	Acier	39,62		1	Lancement de poutre ou véhicule de lancement	<i>MLC</i> 96 tonnes à roues ou 70 tonnes à chenille
1999	<i>Military rapidly emplaced</i>	Acier	12,98		1	Lancement d'un transporteur de pont <i>flatrack</i> <i>powered M1977</i>	<i>MLC</i> 30 tonnes à roués ou chenille

### Ponts permanents

Afin de diminuer au maximum les délais de construction, certaines entreprises ont également élaboré des concepts de ponts préfabriqués permanents. Tout d'abord, ces ponts ont été conçus, pour tout le pays, afin de remplacer les ponts en bois atteignant la fin de leur vie utile. Ceux-ci sont principalement formés d'un tablier préfabriqué en béton appuyé sur des poutres longitudinales en acier. Bien que ces types d'ouvrage soient différents du concept à développer, il est intéressant d'évaluer les techniques qui seraient applicables aux ponts ferroviaires mobiles. Ces systèmes sont appelés : (a) poutres d'acier classiques et système de tablier en béton, (b) système *Railroad Flatcar*, (c) *Composite Space Truss*, (d) Système *Inverset Type Concrete Deck and Steel Composite*, (e) *Fiber Reinforced Concrete (FRC) Arch-Panel Decks*, (f) Système de tablier préfabriqué, (g) ponts-poutres *Under-Slung*, (h) Caisson composé de poutres en acier formé à froid, (i) système de pont ferroviaire préfabriqué, figure 2.18 [U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, 2008b], et (j) tablier de pont Exodermic. Les principales utilisations de ses systèmes permanents sont indiquées dans le tableau 2.11.

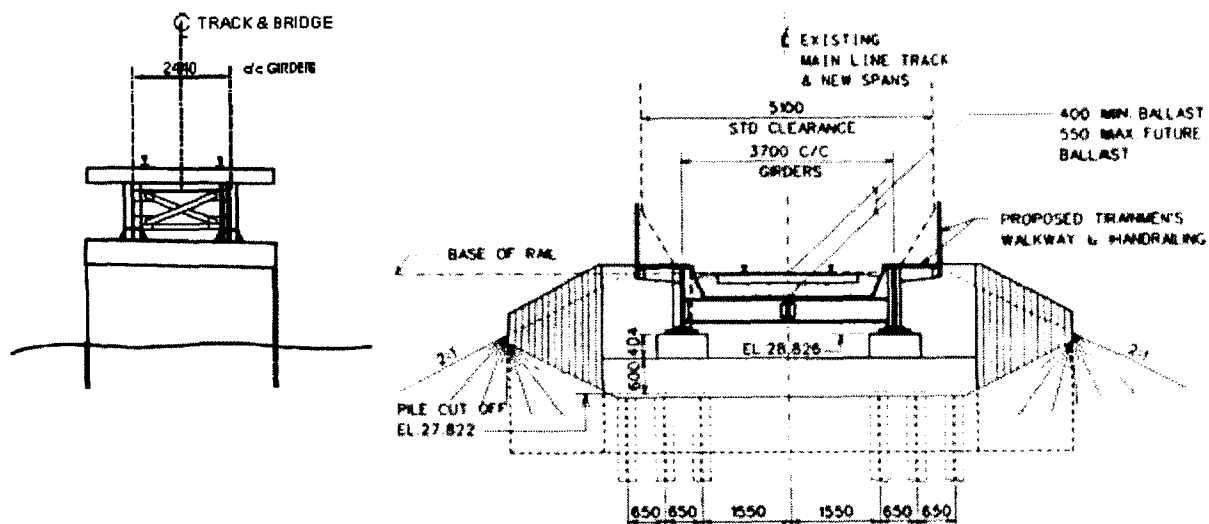


Figure 2.18: Système de pont ferroviaire préfabriqué

Tableau 2.11 : Concepts existants de ponts permanents

Année	Concept	Matériau	Type d'érection	Site
	Poutre d'acier classiques et tablier en béton	Acier-béton	Levée à la grue	Virginie, au-dessus de la rivière James à Richmond
1994	<i>Railroad flatcar</i>	Acier		Californie
	<i>Composite space truss</i>	Acier		Le long viaduc Lully situé sur l'autoroute A1 en Suisse dans le canton de Fribourg et le pont Roize près de Grenoble en France
1980's	<i>Inverset type concrete deck and steel composite</i>	Acier-béton		Projet de remplacement du tablier du pont Tappan Zee
	<i>Fiber reinforced concrete (FRC) Arch-panel decks</i>	Béton renforcé de fibres		2 ponts-poutre au Canada
	Tablier préfabriqué	Acier	Levée à la grue	Virginie, <i>George Washington Memorial Parway</i> (ponts <i>the dead run</i> et <i>Turkey run</i> )
	Ponts-poutres <i>Under-slung</i>	Acier		
	Caisson composé de poutres en acier formé à froid	Acier		Michigan
	Tablier de pont <i>Exodermic</i>	Béton-matériaux composites	Levée à la grue	Pont Tappan Zee et New York

Afin de déterminer quelles caractéristiques devra avoir le futur pont mobile, les principaux éléments de ces ponts transportables et à construction rapide ont été analysés et sont exposés dans cette section.

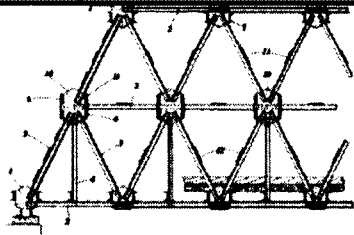
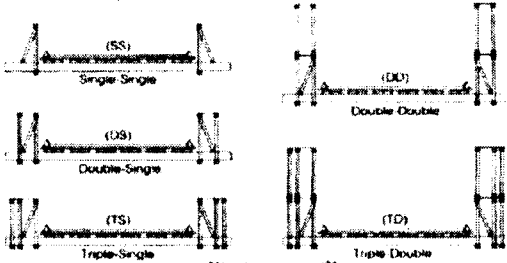
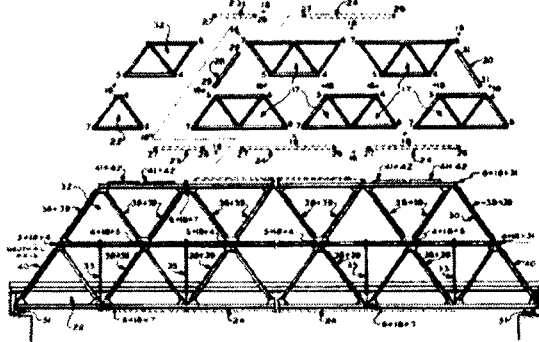

### 2.2.1 Types de pont

En observant attentivement les sections et élévations des ponts mobiles existants, il est possible de les regrouper en trois grandes familles : (a) les systèmes modulaires en acier, (b) les treillis en acier et (c) les ponts préfabriqués en béton.

### Système modulaire en acier

Un système modulaire est constitué de plusieurs sections préfabriquées, identiques et assemblées les unes après les autres. Bien que ces sections préfabriquées soient différentes selon le concept utilisé, la méthode d'assemblage demeure semblable. Le tableau 2.12 présente plusieurs exemples de système modulaire [U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, 2008b].

Tableau 2.12: Exemples de systèmes modulaires

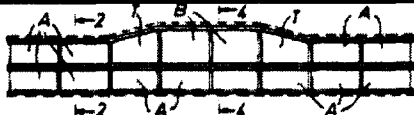

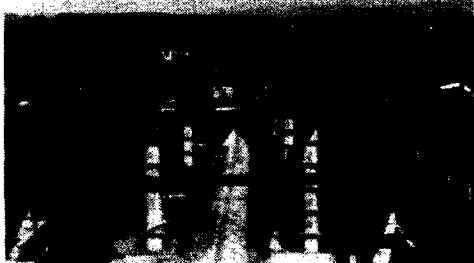
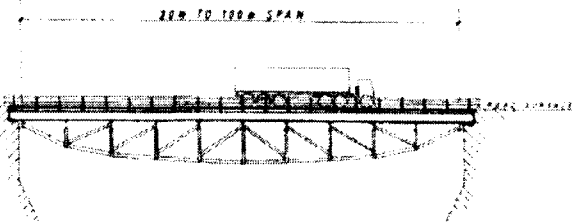
Concept	Système modulaire
Callender-Hamilton	
Bailey	
Acrow	
Quadricon	

### Treillis en acier

Les ponts à treillis sont généralement utilisés afin de limiter le poids des modules, en maintenant une bonne rigidité des sections. Ainsi, l'âme d'une poutre peut être remplacée par un treillis lorsque les dimensions de celle-ci sont importantes. Il s'agit alors d'une poutre-treillis.

L'emploi de treillis pour les ponts à construction accélérée permet l'utilisation de sections préfabriquées et limite ainsi le nombre de connexions à effectuer sur le site. Le tableau 2.13 en illustre quelques exemples [U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, 2008b].

Tableau 2.13: Exemples de treillis

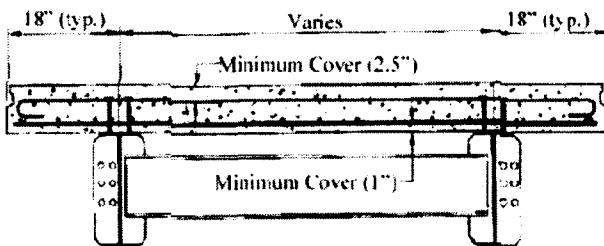
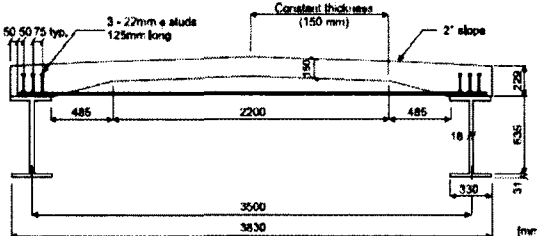
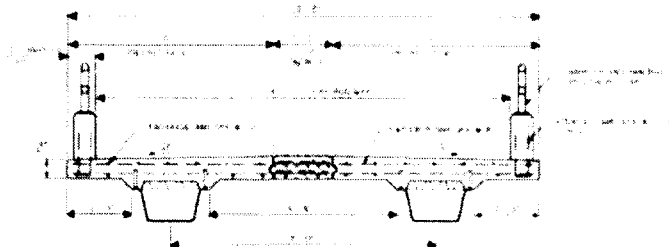
Concept	Treillis
<i>Mabey Johnson</i>	
<i>Composite Space Truss</i>	 
<i>Ponts-poutres Under-Slung</i>	



### Préfabriqué en béton

Les ponts permanents à construction accélérée sont majoritairement composés d'un tablier en béton. Afin d'accélérer l'érection de ce type de structure, les sections de béton sont préfabriquées. Ces sections sont généralement en béton armé ou précontraint et peuvent, dans certains cas, contenir de l'armature en matériaux composites. Quelques exemples de tablier préfabriqué en béton sont illustrés au tableau 2.14 [U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, 2008b].

Tableau 2.14: Exemples de ponts en béton

Concept	Section transversale
<i>Inverted type concrete deck and steel composite</i>	
<i>Fiber reinforced concrete (FRC) Arch-panel decks</i>	
<i>Caisson composé de poutres en acier formé à froid</i>	

### 2.2.2 Connexions

Le nombre de connexions a une grande importance lors de l'assemblage des ponts mobiles puisqu'il est synonyme de leur temps de mise en place. Les connexions doivent donc être les plus simples possible et en nombre restreint. Les techniques d'assemblage les plus rapides à mettre en place sont celles des connexions boulonnées et des systèmes à goupille.

### Boulonnage

Le boulonnage est la méthode de connexion la plus couramment utilisée. Les sections d'acier sont reliées entre elles à l'aide de boulons et de plaques de connexion. La figure 2.19 [U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, 2008b] représente ce type de connexion. Afin de faciliter l'assemblage de la structure sur le site de construction, l'utilisation de boulons identiques (matériau, diamètre, etc.) est conseillée pour l'ensemble de la structure. Des connexions de type « sans glissement » (*slip critical*) sont utilisées dans la majorité des cas nécessitant une structure rigide.

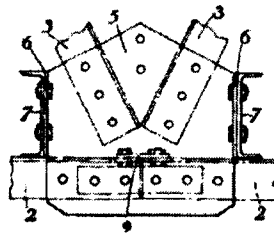


Figure 2.19: Connexion par boulonnage - Pont Callender-Hamilton

### Système à goupille

Un système à goupille est utilisé afin de limiter le nombre de manipulations à effectuer pour l'érection d'un ouvrage. C'est le cas du pont *Mabey-Johnson* (figure 2.20) où un seul boulon est utilisé pour chacune des connexions [U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, 2008b]. Bien que le diamètre du boulon soit plus grand que ceux utilisés pour une connexion par boulonnage, le système à goupille accélère considérablement le délai d'assemblage. Toutefois, puisqu'il s'agit d'une connexion « par contact » (*bearing type*), la mise en place de cet assemblage est plus difficile car le boulon unique doit être très ajusté. Pour faciliter le travail, il faudrait augmenter le diamètre du trou, ce qui engendrerait une diminution de la rigidité de l'assemblage sous des charges dynamiques.

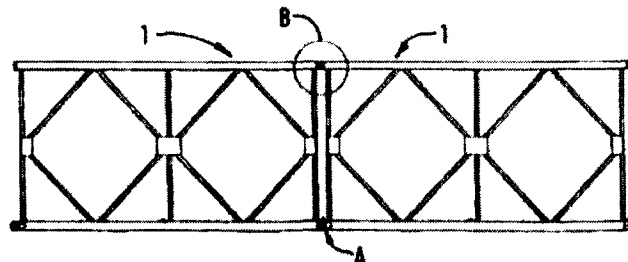


Figure 2.20: Connexion par système à goupille - Pont Mabey-Johnson

### 2.2.3 Méthodes de construction

Dans le cas d'un pont mobile, la méthode de construction doit permettre une érection rapide. Les ponts préfabriqués offrent des avantages significatifs contrairement aux ponts construits directement sur un site. La précision possible en usine (milieu contrôlé) assure une grande qualité de réalisation et une meilleure performance à long terme. Par exemple, la précision de l'emplacement des barres d'armature dans une dalle en béton préfabriquée est supérieure à celle construite sur le chantier. Cette façon de faire diminue également les coûts de production puisque le manque d'espace sur un chantier peut rendre plus complexe les techniques de construction; ce qui augmente le temps d'exécution. Que l'ouvrage soit mis en place par lancement (d'une rive à l'autre), à l'aide d'une grue ou qu'il soit installé directement sur un véhicule motorisé, le délai nécessaire à l'érection d'un pont mobile doit être le plus court possible.

#### Lancement

Lorsque l'emprise le permet, il est possible d'utiliser le lancement en cantilever pour la mise en place d'une superstructure. Toutefois, celle-ci doit être adaptée pour pouvoir utiliser ce type de méthode. Des câbles et/ou un nez de lancement (*launching nose*) sont alors fixés à l'extrémité du tablier afin d'assurer une grande rigidité à la première section lancée. Cette façon de procéder facilite l'atteinte de l'autre rive. Cette méthode nécessite suffisamment d'emprise pour assembler les sections les unes après les autres, à même la rive de lancement. Tel qu'illustré à la figure 2.21, le pont *Bailey* utilise généralement cette méthode de construction.

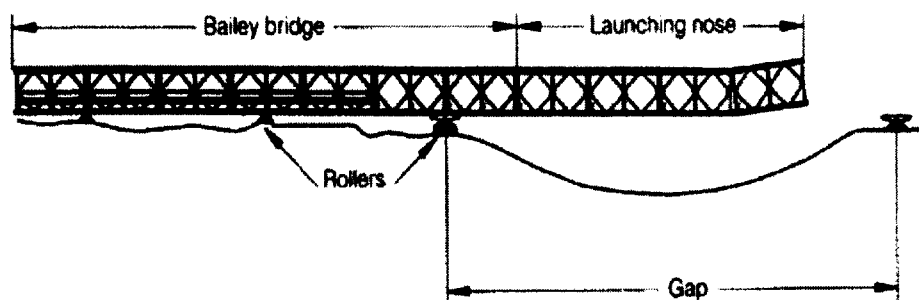


Figure 2.21: Lancement - Pont *Bailey*

**Levage à la grue**

L'utilisation d'une grue facilite la mise en place d'éléments modulaires. Par contre, elle limite l'aire de travail disponible pour l'assemblage de la structure. Il faut donc considérer, non seulement les caractéristiques de la grue (tableau 2.8), mais aussi ses dimensions (figure 2.16) afin d'assurer le bon déroulement de la manœuvre de levage.

**Motorisée**

Dans certains cas, l'ouvrage peut être fixé à un véhicule motorisé. Cette méthode est surtout utilisée pour les ponts militaires. La structure est alors installée sur un char d'assaut. Lorsque ce dernier doit traverser un fossé, elle est glissée devant le char afin qu'il puisse franchir l'obstacle. Il arrive également que le char reste en place pour permettre le passage de militaires.

**2.2.4 Matériaux structuraux pour les ponts mobiles**

Les matériaux de construction ont aussi une importance marquée pour la durabilité des sections de ponts. Plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés tels que : l'acier, le béton, l'aluminium et les matériaux composites. Bien que l'acier et le béton soient des matériaux utilisés plus fréquemment dans la construction d'ouvrages d'art, l'aluminium offre une meilleure durabilité [Siwowski, 2006]. Sa résistance mécanique, sa légèreté, sa résistance à la corrosion et ses techniques de fabrication rendent ce matériau très intéressant. De leur côté, les polymères renforcés de fibres (PRF) ont été améliorés au cours des dernières années. Leur comportement étant de plus en plus étudié, il est possible désormais d'affirmer que ces matériaux sont les plus légers et ont une très bonne résistance aux forces et à la corrosion [Wight et coll., 2006]. Tout comme l'aluminium, les matériaux composites sont plus dispendieux à fabriquer que l'acier, mais, en raison de leur légèreté, ils peuvent diminuer les coûts de transport et de construction.

## 2.3 Comparaison : ponts routiers versus ponts ferroviaires

Bien que plusieurs types de ponts mobiles routiers existent actuellement, plusieurs facteurs démontrent qu'ils sont tous inappropriés pour le domaine ferroviaire. Cette section fournit quelques comparaisons entre les ponts routiers et les ponts ferroviaires qui démontreront la nécessité d'élaborer un nouveau concept de pont mobile afin de limiter les impacts d'une interruption de service ferroviaire.

### 2.3.1 Travée simple versus travées continues

Afin de faciliter le remplacement des structures et de limiter la durée de la construction, les ponts ferroviaires sont à travée simple. Du côté des ponts routiers, il est généralement préférable qu'ils soient à travées continues afin de diminuer la valeur du moment fléchissant maximal (redistribution sur l'ensemble de la structure) et d'améliorer la robustesse de l'ouvrage. De plus, lorsque les mouvements anticipés le permettent, le ministère des Transports du Québec favorise un pont à travées continues plutôt qu'un pont ayant deux travées simples. La pile est alors préservée d'une détérioration prématurée causée par l'eau qui s'infiltre via le joint de construction.

### 2.3.2 Ballast versus enrobé bitumineux

L'utilisation d'une couche de ballast pour limiter l'impact de la vibration sur la structure augmente considérablement les efforts dus à la charge morte. En comparant, le poids des couches d'enrobé bitumineux à celui du ballast ajouté aux traverses de bois et aux deux rails, il est facile d'affirmer que la structure ferroviaire doit supporter une charge plus importante que celle d'une structure routière.

Ainsi, pour une section transversale ayant une largeur de 5,486m (18pi), un pont ferroviaire constitué de ballast aura une charge morte de 27,72kN/m alors que pour un pont routier, elle sera de 8,39kN/m. Le détail des calculs est présenté au tableau 2.15.

Tableau 2.15: Comparaison des charges mortes appliquées sur le tablier

Type de pont	Élément	Calcul*	Charge
Ferroviaire	<b>Ballast</b>	$0,152 \cdot 5,486 \cdot 1 = 0,834\text{m}^3$	15,73kN
	Épaisseur : 0,152m (6po)	$0,834 \cdot \frac{1922,22 \cdot 9,81}{1000} = 15,73\text{kN}$	
	Largeur : 5,486m (18po)		
	<b>Rails</b>	$2 \cdot 297,633 = 595,266\text{kg}$	5,84kN
	1 voie = 2 rails	$595,266 \cdot \frac{9,81}{1000} = 5,84\text{kN}$	
	<b>Traverses</b>	Par traverse :	6,15kN
	Section : 0,25 x 0,25m	$0,25^2 \cdot 2,61 = 0,163\text{m}^3$	
Routier	Longueur : 2,61m	Pour 4 traverses :	
	Nombre : 4 par mètre	$4 \cdot 0,163 = 0,652\text{m}^3$	
		$0,652 \cdot \frac{961,108 \cdot 9,81}{1000} = 6,15\text{kN}$	
	<b>Total</b>	<b><math>15,73 + 5,84 + 6,15 = 27,72\text{kN}</math></b>	<b>27,72kN</b>
	<b>Enrobé bitumineux</b>	$0,065 \cdot 5,486 \cdot 1 = 0,357\text{m}^3$	8,39kN
	Épaisseur : 0,065m	$0,357 \cdot 23,5 = 8,39\text{kN}$	
	Largeur : 5,486m		

\*La masse volumique des matériaux est donnée au tableau 15-1-5 de l'AREMA et au chapitre 3 de la CAN/CSA-S6-06.

### 2.3.3 Locomotive *Cooper E80* versus camion *CL-625*

Les charges vives appliquées aux structures ferroviaires et routières sont également différentes. Une locomotive *Cooper E80* doit être considérée pour la conception d'une structure ferroviaire, alors qu'un camion *CL-625* doit l'être pour un ouvrage routier. Les figures 2.22 à 2.25 illustrent l'effort tranchant, le moment fléchissant maximal ainsi que leur rapport (ferroviaire sur routier) établi en fonction de la portée. Ces courbes démontrent que, pour une portée de 30m, la structure ferroviaire doit résister à un moment fléchissant deux fois plus grand que celui exercé sur un ouvrage routier ayant la même portée. Les types de ponts mobiles utilisés actuellement n'ont donc pas une capacité suffisante pour supporter les charges d'une locomotive *Cooper E80*. Dans le cadre de ces comparaisons, aucun coefficient dynamique n'a été considéré. Les valeurs utilisées pour ces graphiques proviennent des tableaux 3.2-4 et 3.2-5 du *Manuel de conception, volume 1* du ministère des Transports du Québec [ministère des Transports du Québec, 2004] et du tableau 15-1-16 de l'AREMA [AREMA, 2003].

Quant aux charges d'impact, puisqu'elles sont reliées à la charge vive, elles sont également supérieures pour un pont ferroviaire. Cependant, il est possible de limiter la vitesse d'un train

afin de réduire les charges d'impact [AREMA, 2003]; ce qui est habituellement impossible pour un ouvrage autoroutier.

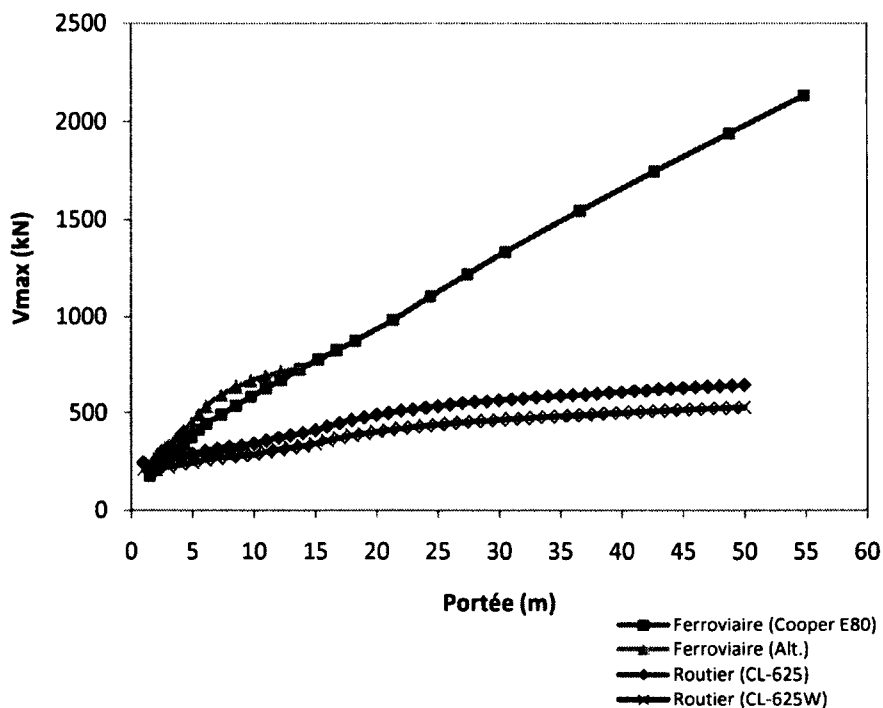


Figure 2.22: Ponts routiers et ferroviaires - Effort tranchant en fonction de la portée

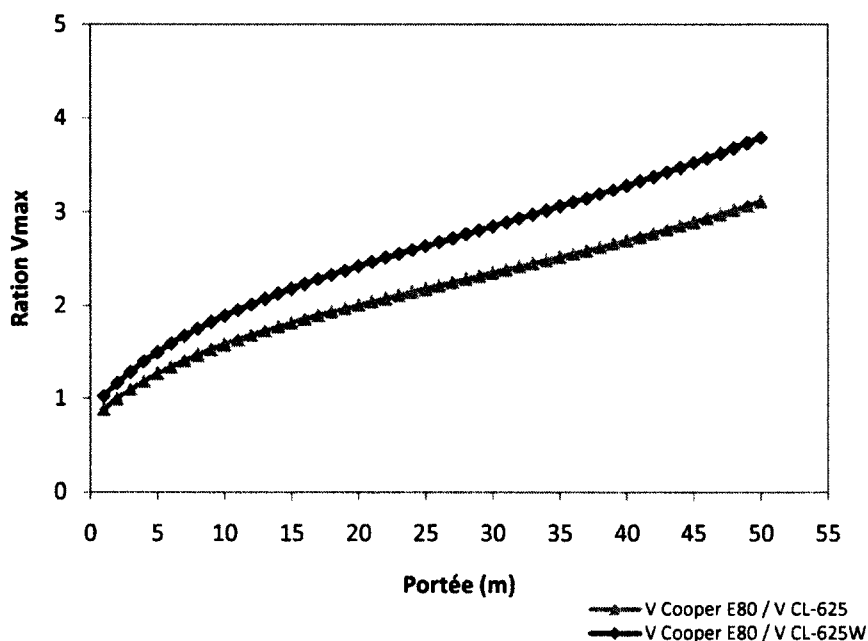


Figure 2.23: Ponts routiers et ferroviaires - Rapport de l'effort tranchant

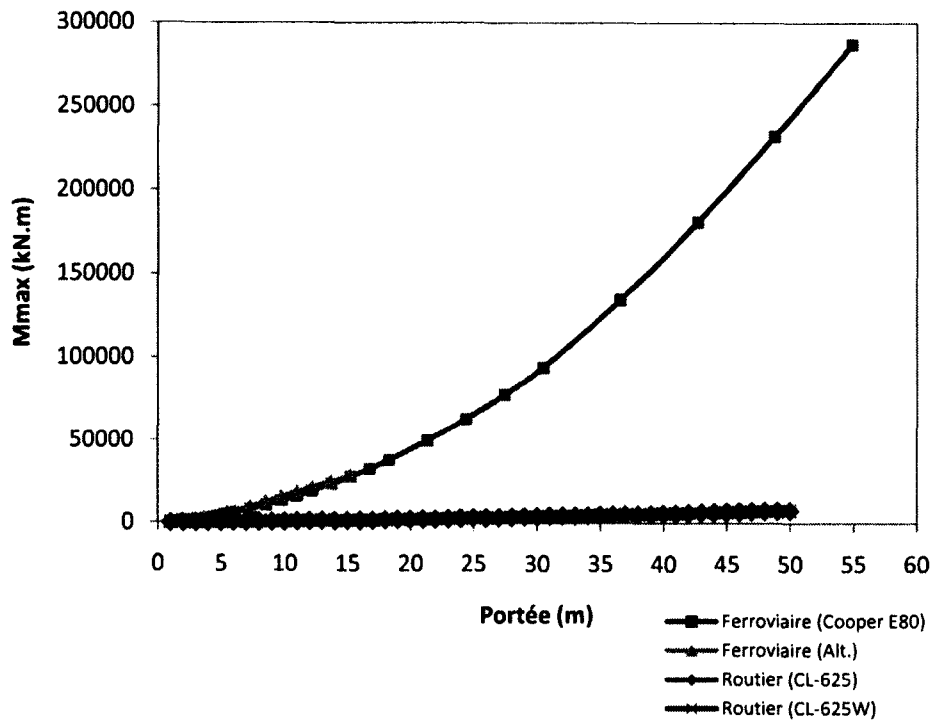


Figure 2.24: Ponts routiers et ferroviaires - Moment en fonction de la portée

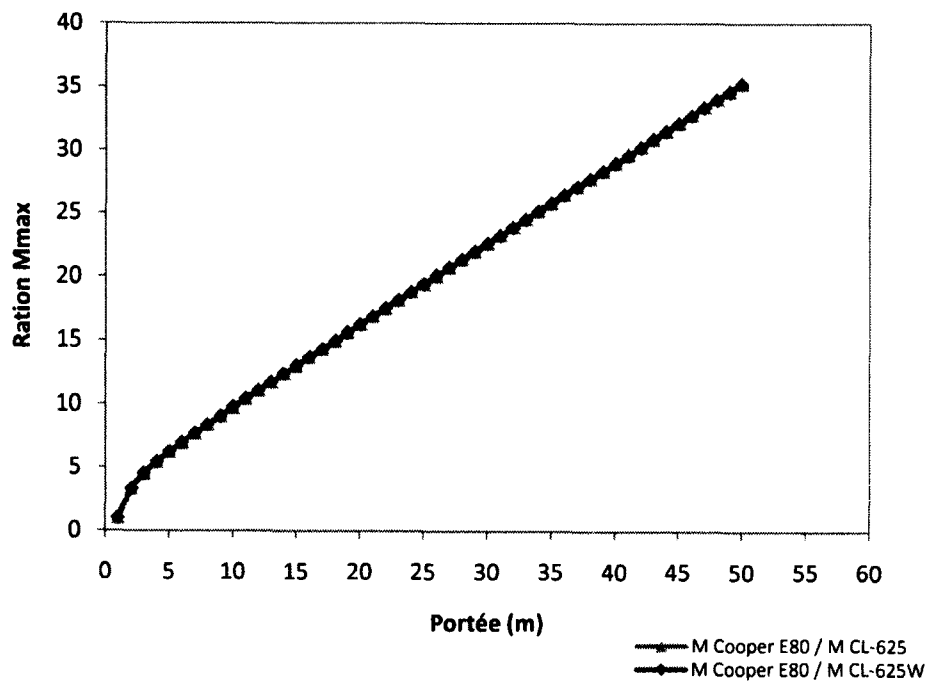


Figure 2.25: Ponts routiers et ferroviaires - Rapport du moment



### 2.3.4 Flèche

La flèche est généralement le facteur qui contrôle le dimensionnement d'un tablier avec rails. La rigidité du tablier doit donc être conçue de telle sorte qu'elle puisse reprendre les efforts sans trop se déformer. Quelques structures de ponts routiers sont également contrôlées par la flèche. Ce critère est toutefois moins restrictif pour ce type de structures.

Pour les ouvrages routiers, la norme *CAN/CSA-S6-06* présente, dans un graphique (figure 2.26), la limite de flèche admissible en fonction de la fréquence de vibration de l'ossature du pont alors que le *Manuel de conception des structures, volume 1* du ministère des Transports du Québec la limite à un ratio de  $L/1000$  pour les ponts avec trottoirs et  $L/800$ , pour les autres. Pour les ponts ferroviaires, l'*AREMA* exige une flèche maximale de  $L/640$ .

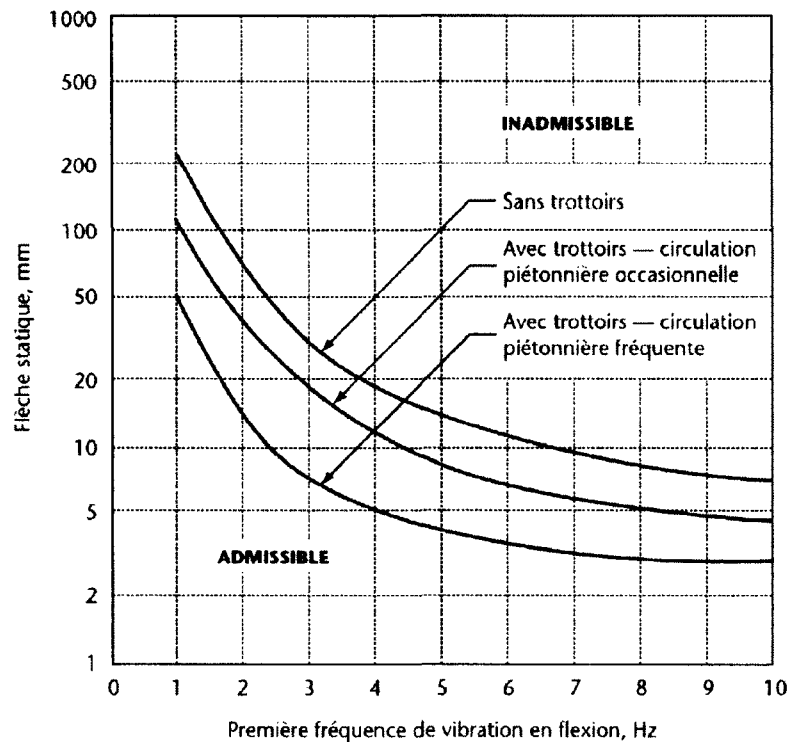


Figure 2.26: Limites de flèche pour les vibrations de l'ossature des ponts routiers [Association canadienne de normalisation, 2006, figure 3.1]

### 2.3.5 Fatigue

En raison des grandes vibrations causées par le passage d'un train, la fatigue est plus contraignante pour les ponts ferroviaires. L'utilisation de connexions boulonnées plutôt que celle de soudures est une façon de préserver la structure contre ce phénomène. Ces dernières, étant plus sujettes à la fatigue, elles sont donc à proscrire.

Selon la norme *CAN/CSA-S6-06*, la fatigue est définie en fonction du type d'assemblage. Généralement, un dimensionnement de classe C est suffisant pour respecter les critères de fatigue de cette norme. Toutefois, pour les ouvrages ferroviaires, le critère est plus sévère. Dans l'*AREMA*, les charges de fatigue pour les soudures sont calculées à l'aide de l'équation 2.1.

$$0,55F_y \text{ kips} \quad (2.1)^1$$

Le tableau 2.17 présente les classes admissibles pour différents «  $F_y$  », en respectant les exigences du tableau 2.16.

**Tableau 2.16: Charge admissible pour des connexions « sans glissement » (ksi) [AREMA, 2003, Table 15-9-2]**

Contact Surface of Bolted Parts	Hole Type and Direction of Load Application							
	Any Direction				Transverse		Parallel	
	Standard		Oversize and Short Slot		Long Slots		Long Slots	
	A325	A490	A325	A490	A325	A490	A325	A490
Class A (Slip Coefficient 0.33) Clean mill scale and blast-cleaned surfaces with Class A coatings (Note 1)	17	21	15	18	12	15	10	13
Class B (Slip Coefficient 0.50) Blast-cleaned surfaces and blast- cleaned surfaces with Class B coating (Note 1)	28	34	24	29	20	24	17	20
Class C (Slip Coefficient 0.40) Hot dip Galvanized and roughened surfaces	22	27	19	23	16	19	14	16
Note 1: Coatings classified as Class A or Class B includes those coatings which provide a mean slip coefficient not less than 0.33 or 0.50, respectively, as determined by Testing Method to Determine the Slip Coefficient for Coatings Used in Bolted Joints, see Appendix A of Bibliography 90.								

<sup>1</sup> [AREMA, 2003, Table 15-1-13]

Tableau 2.17: Fatigue des ponts ferroviaires- Classes admissibles en fonction de  $F_y$ 

$F_y$ kips	$0,55F_y$	Classe
36	19,8	A
50	27,5	A

## 2.4 Élaboration du concept

En analysant les méthodes actuellement utilisées, des choix se sont imposés dès le début de la conception. Cette section réunit les conclusions tirées des analyses sommaires présentées précédemment.

### 2.4.1 Types de pont

Il existe cinq types de pont ferroviaire en acier : (a) les ponts poutres, (b) les ponts bi-poutres, (c) les ponts à poutres latérales, (d) les ponts à treillis latéraux et (e) les ponts à treillis fermé. Chacune de ces alternatives sera considérée pour des portées de 5 à 28m. Afin de limiter les possibilités, trois types de portée seront considérés (tableau 2.18).

Tableau 2.18: Types de portée

Type	Longueur
Courte	9,144m (30pi)
Moyenne	18,288m (60pi)
Longue	27,432m (90pi)

En raison des délais requis pour sa mise en place et son retrait, l'utilisation de ballast semble inappropriée pour le tablier. Un tablier ouvert pourra être utilisé puisqu'il s'agit d'un pont temporaire et que l'entretien s'effectuera entre les installations. Puisqu'il n'y aura pas de ballast, les traverses de bois devront être fixées directement à la superstructure.

Des sections préfabriquées de diverses longueurs seront à considérer lors de la conception. Les sections d'extrémité devront être ajustables en longueur. De plus, trois profondeurs différentes devront être considérées pour permettre la réutilisation des appuis existants.

### 2.4.2 Connexion

Un système à goupilles est inapproprié pour le domaine ferroviaire puisque les charges exigent la manipulation d'un boulon unique de très grande dimension. Pour diminuer les délais d'érection et de démantèlement, mais également pour respecter les exigences des normes et guides, des connexions boulonnées sont donc retenues pour l'assemblage du pont mobile.

### 2.4.3 Transport, érection et démantèlement

Le transport, l'érection et le démantèlement s'effectueront en utilisant des camions semi-remorque et des wagons réguliers qui assureront le transport, alors qu'une grue de type *Demag AC1600* permettra l'érection et le démantèlement. Les sections devront donc avoir les dimensions maximales permises pour ces équipements. Le pont temporaire devra être transporté, érigé et mis en service en moins de 48 heures. Le transport des matériaux devra s'effectuer dans les 24 premières heures.

### 2.4.4 Matériaux

En tenant compte des normes présentées à la section 2.1.2, les matériaux utilisés devront respecter de nombreuses caractéristiques. Celles-ci sont énumérées ci-après.

#### Acier

Le type d'acier doit varier en fonction de son emplacement et de son utilisation. Ainsi, l'acier des poutres longitudinales est différent de celui utilisé pour les boulons.

Structure principale et secondaire :

- $F_y=345\text{MPa}$  (50 000psi)
- Module d'élasticité,  $E=200\,000\text{MPa}$
- $G=77\,000\text{MPa}$
- $F_u=450\text{MPa}$

Boulons :

- A325
- Capacité en cisaillement: 117,21MPa (17000psi)
- Géométrie et capacité des boulons en fonction de leur diamètre (tableau 2.19)

Tableau 2.19: Caractéristiques des boulons en fonction de leur diamètre

Caractéristique	Boulon	
	1po	1½po
Br (kN)	59,39	133,63
Diamètre (mm)	25	38
Distance minimum entre les boulons (mm)	80	115
Distance maximum entre les boulons (mm)	150	225
Distance d'extrémité minimale (mm)	40	60

### Bois

Les traverses du CN sont généralement construites avec des pièces de bois ayant une section transversale de 25X25cm (10X10po) et une longueur de 2,61m (8pi-6¼po). Lors de la conception de l'ouvrage, une masse volumique de 961,11kg/m<sup>3</sup> (60lb/pi<sup>3</sup>) peut être considérée pour ce type de bois.

### Béton, aluminium et matériaux composites

D'autres matériaux, tels le béton, l'aluminium et les matériaux composites, pourraient également être utilisés. Cependant, dans le cadre de ce projet de maîtrise, seule une conception en acier est présentée. Il est tout même important de noter que les mêmes documents de référence devront également être utilisés pour ces matériaux.

## CHAPITRE 3 ÉTUDE DE CONCEPT

### 3.1 Démarche générale

Afin de vérifier si les choix retenus à la section 2.4 sont applicables à ce projet, de nombreux calculs et dessins ont été réalisés. Les équations utilisées et quelques exemples de calcul sont présentés à l'annexe A. L'étude de concept a permis de définir la géométrie générale des structures à partir de l'élancement et de la géométrie des structures du CN. Les dimensions et le poids des sections ont également été définis pour respecter les exigences de transport, d'érection et de démantèlement. Toutefois, aucun calcul structural élaboré n'a été réalisé dans cette étude de concept. Les types de ponts retenus ont donc été étudiés en respectant les normes et particularités du CN. Les plans de l'annexe B illustrent ces types de pont.

### 3.2 Alternatives

#### 3.2.1 Pont poutres

Les tabliers des ponts poutres (*Beam Span*) sont constitués de poutres longitudinales. Dans le cas des ponts ferroviaires, ils peuvent être formés de trois ou quatre poutres longitudinales reliées transversalement par des profilés en « C » ou en « I » qui assurent leur résistance et leur stabilité latérale. Sans dalle ni ballast, les traverses de bois sont directement appuyées sur les poutres principales. Ce type de pont est facile à assembler puisqu'il est constitué de connexions simples et régulières.

Afin de limiter la largeur de la superstructure, les poutres longitudinales sont installées directement sous les traverses de bois. La largeur de la structure est donc limitée à celle de ces traverses.

Puisque la largeur de l'ouvrage doit être augmentée pour permettre l'accès aux connexions, une section transversale de plus de quatre poutres longitudinales ne peut être envisageable. Un pont à trois poutres et un autre à quatre poutres sont donc les deux seules alternatives retenues.

La profondeur des poutres est variable en fonction du moment fléchissant. Puisque le moment fléchissant est relié à la portée, une profondeur de poutre est calculée pour chacune d'entre elles. Ces profondeurs sont énumérées au tableau 3.1.

Tableau 3.1: Pont poutres - Profondeur des poutres principales en fonction de la portée

Type	Portée		
	courte	moyenne	longue
<b>3 poutres</b>	0,76m	1,53m	2,29m
<b>4 poutres</b>	0,61m	1,22m	1,83m

Tel qu'illustré aux figures 3.1 à 3.3, le système transversal est associé à la profondeur des poutres longitudinales. Pour les ponts de courte portée (section A-A), des profilés en « I » ou en « C » sont installés transversalement. Par contre, pour les ponts à poutres plus profondes, des cornières, dos-à-dos, installées en forme de « X » sont préférables pour empêcher leur déversement latéral. Les poutres des sections B-B résistent aux charges correspondant à une moyenne portée tandis que celles des sections C-C le font pour les charges d'une longue portée.

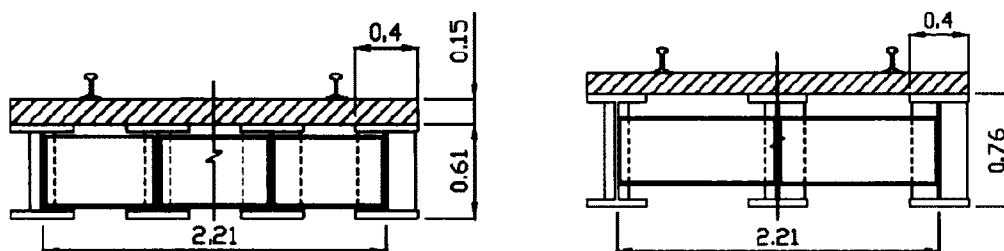


Figure 3.1: Pont poutres - Sections A-A

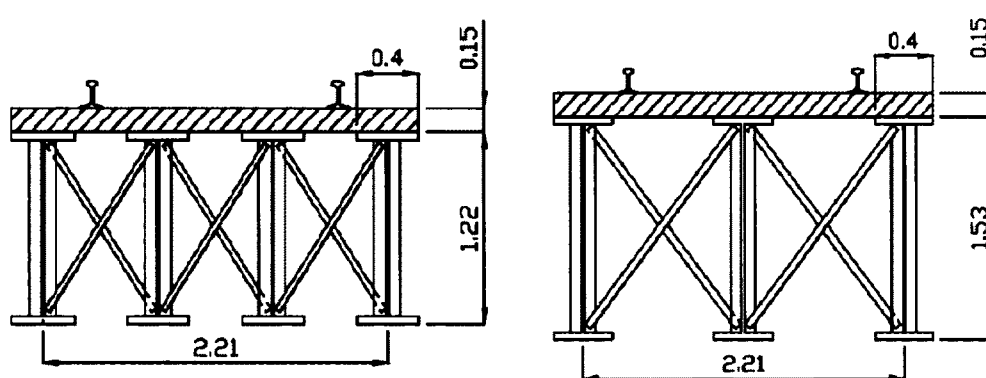


Figure 3.2: Pont poutres - Sections B-B

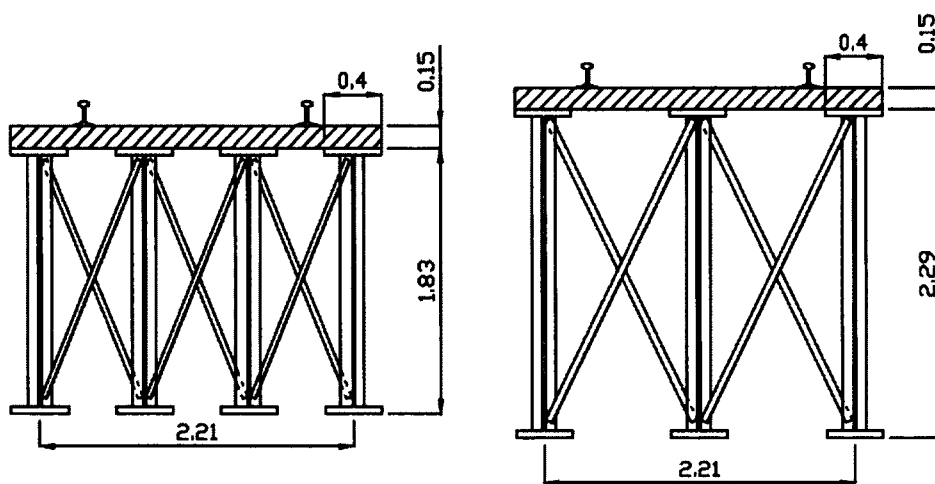


Figure 3.3: Pont poutres - Sections C-C

Pour permettre l'utilisation des fondations existantes, les sections d'extrémité doivent être peu profondes. Les sections A-A seront celles situées aux appuis auxquels seront fixées les sections intermédiaires suivies de celles plus profondes, si besoin. La figure 3.4 donne un aperçu de l'apparence longitudinale d'un pont à longue portée. Les sections centrales sont les plus profondes puisque le moment fléchissant y est plus important. De plus, des raidisseurs intermédiaires sont installés au changement de profondeur afin d'assurer une bonne répartition des efforts dans la superstructure. Les contreventements sont situés à 2,34m de l'extrémité du pont alors que les autres sont espacés, centre à centre, de 1,75m.

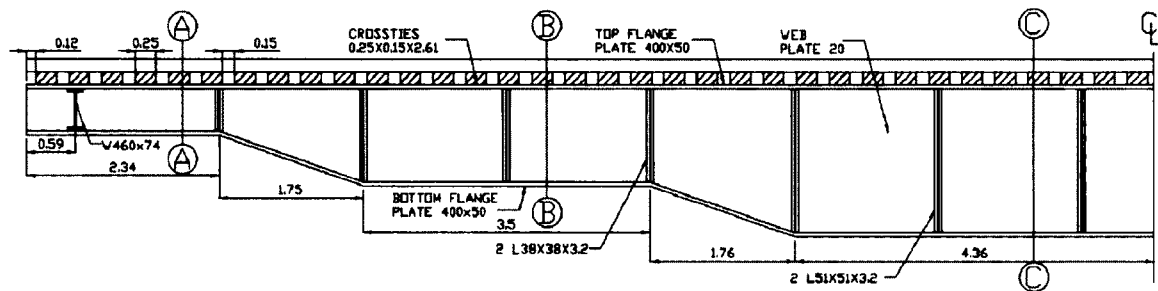


Figure 3.4: Pont à 4 poutres (27,432m) - Élévation

La longueur des sections d'extrémité a été définie en fonction de l'espace requis pour utiliser les appareils d'appui existants. La profondeur des sections varie progressivement suivant un angle de 30 degrés et leur longueur permet un espace suffisant pour installer les plaques nécessaire à la connexion des sections entre elles.



### 3.2.2 Pont bi-poutres

Semblable au pont poutres, le bi-poutres (*Plate Girder*) est fabriqué à l'aide de deux poutres principales sur lesquelles reposent directement les traverses de bois. Les semelles des poutres longitudinales sont situées aux extrémités des traverses afin d'augmenter la largeur du tablier et ainsi favoriser la stabilité transversale. De cette façon, l'âme de la poutre n'est pas alignée avec le rail. Un profilé en « I » est également utilisé comme système latéral pour contrer le déversement de ces deux grandes pièces d'acier. Par contre, pour de plus grandes portées, des cornières, dos-à-dos, installées en forme de « X » sont généralement utilisées puisqu'elles sont constituées d'une quantité d'acier moins importante que celles des profilés en « C » ou en « I ». La position des contreventements est établie en fonction de la grosseur des plaques de connexion et de l'espacement, centre à centre, maximal requis pour la profondeur des sections.

Tout comme pour celui à plusieurs poutres, ce type de pont nécessite un grand espace sous la structure afin d'y installer les poutres longitudinales. Ceci peut être problématique au niveau de la circulation environnante puisque le dégagement vertical sous la structure est alors restreint. L'élévation des rails devant être conservée, l'utilisation des appuis existants peut également être problématique si le nouveau tablier est plus profond.

#### Sections

Puisque seulement deux poutres sont utilisées pour reprendre tous les efforts, leurs profondeurs sont supérieures à celles sélectionnées pour les ponts poutres. La figure 3.5 illustre que des profondeurs d'appui de 0,92m, 1,83m et 2,75m (3pi, 6pi et 9pi) sont considérées et adéquates pour les trois longueurs de portée.

Bien que l'utilisation de la même section soit possible sur l'ensemble d'une longue portée, la combinaison de sections y est préférable. La figure 3.6 montre l'aspect longitudinal résultant de cette économie de matériaux. Cette méthode permet également à un ouvrage de même longueur de s'adapter à trois hauteurs d'appuis différentes. Comme pour les ponts poutres, la longueur des sections a été établie de façon à libérer l'espace nécessaire pour les plaques de connexion et en considérant la longueur d'un appui ainsi que la variation de profondeur à un angle de 30 degrés.

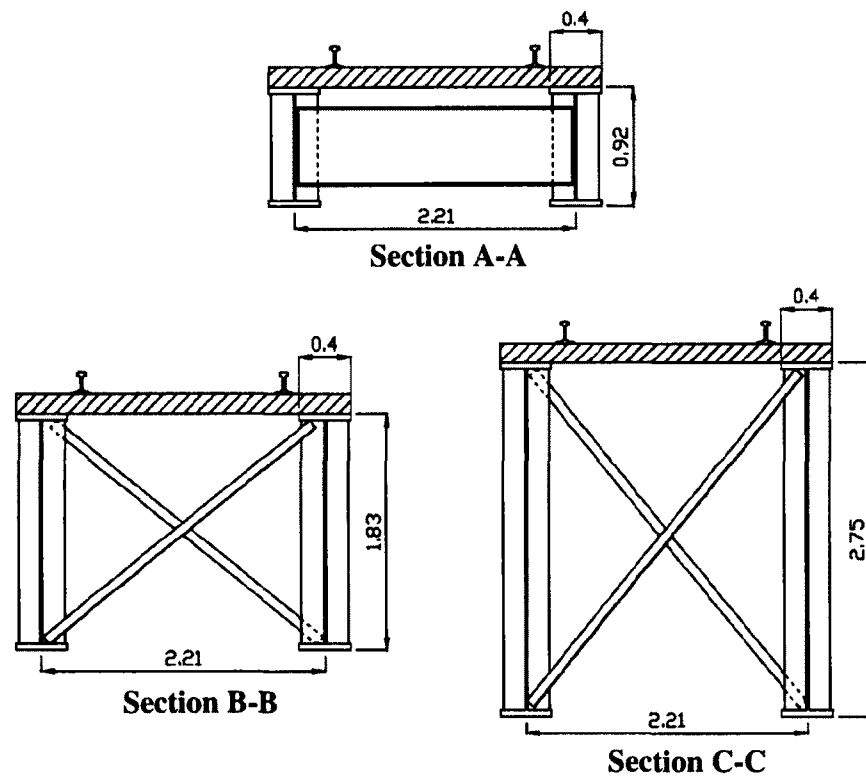


Figure 3.5: Pont bi-poutres - Sections

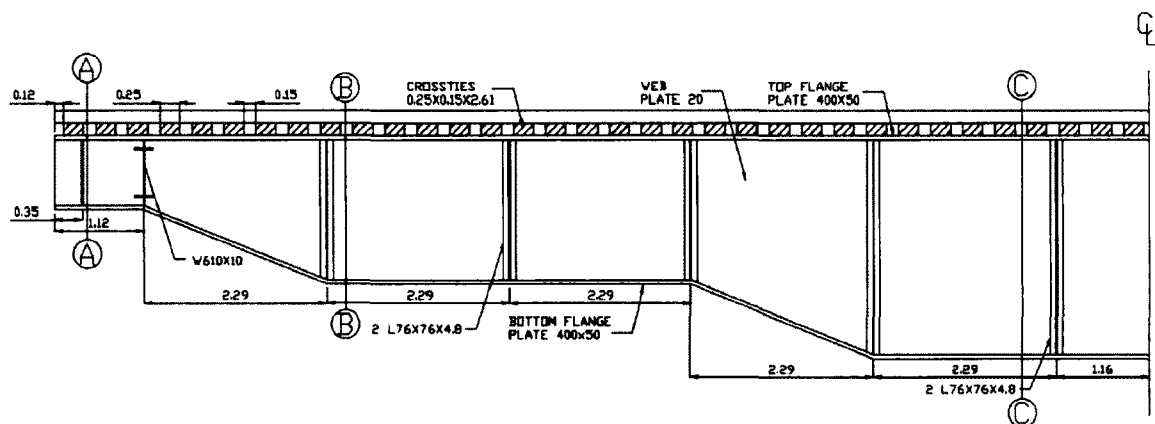


Figure 3.6: Pont bi-poutres (27,432m) - Élévation

### 3.2.3 Pont à poutres latérales

Afin de limiter l'espace requis sous la structure pour la construction du tablier, les poutres longitudinales d'un pont à poutres latérales (*Through Girder*) sont installées de part et d'autre des traverses de bois. En raison du gabarit de voie à respecter, en plus de la largeur de leurs semelles, les poutres doivent être distancées d'au moins 5,5m. Les traverses de bois ne mesurant que 2,61m, une poutre transversale doit être utilisée pour assembler tous les éléments du tablier. Enfin, des longerons permettent la redistribution des efforts des traverses aux poutres transversales.

#### Sections

La différence de quantités de matériau entre trois, quatre ou cinq longerons n'est pas considérable. Par contre, par souci de géométrie et pour faciliter les assemblages, il est préférable que la distribution des efforts s'effectue sur quatre longerons.

Quant à elle, la trop grande largeur de l'ouvrage sera problématique lors du transport des sections préfabriquées. Afin d'en faciliter la manipulation, la superstructure est divisée en trois sections : deux sections latérales et une centrale de 2,7m (figure 3.7).

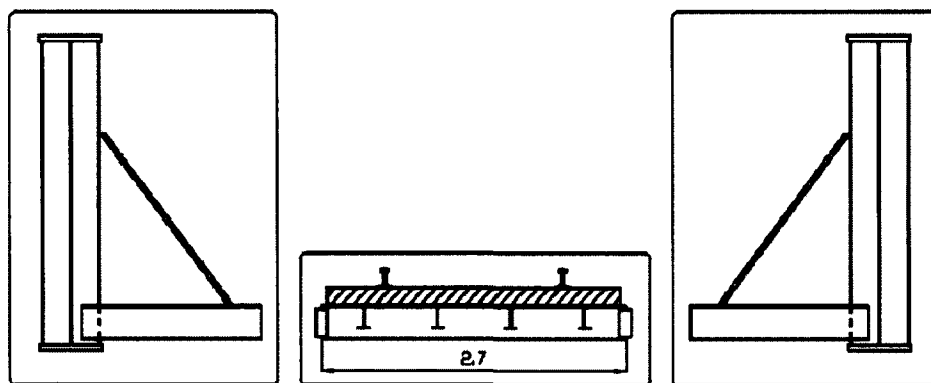


Figure 3.7: Pont à poutres latérales - Division de la structure

L'utilisation de cornières fixées aux poutres longitudinales empêche leur déversement latéral; ce qui influence la largeur du tablier afin de respecter les dimensions du gabarit. Puisqu'une poutre moins profonde est nécessaire dans le cas d'une portée plus courte, la largeur de l'ouvrage est donc restreinte comparativement à celle requise pour une moyenne portée. Pour cette dernière, une largeur minimale de 6,3m est requise afin de respecter le gabarit de la voie.

La longueur des sections permet d'avoir suffisamment d'espace pour les plaques de connexion et pour assurer une variation de profondeur suivant un angle de 30 degrés. De plus, la section d'extrémité a une longueur horizontale suffisante pour la réutilisation des appareils d'appui. Les figures 3.8 à 3.10 présentent les sections de ce type de pont.

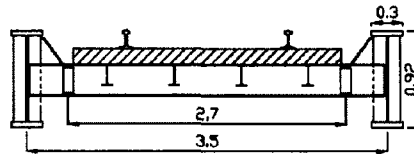


Figure 3.8: Pont à poutres latérales - Section A-A

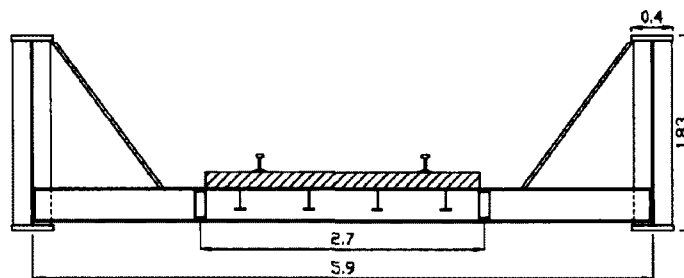


Figure 3.9: Pont à poutres latérales - Section B-B

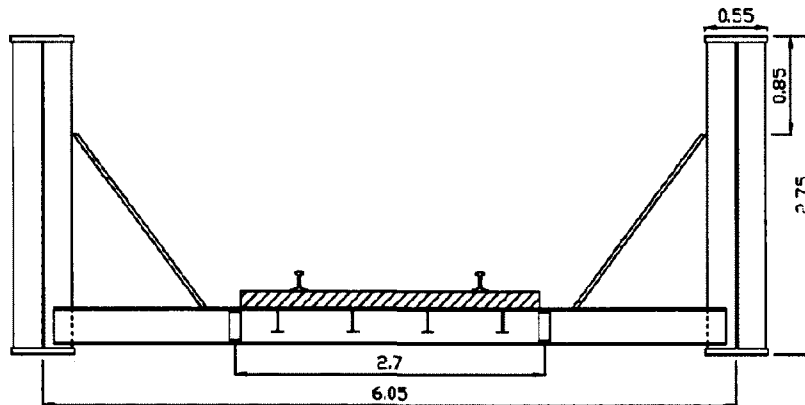
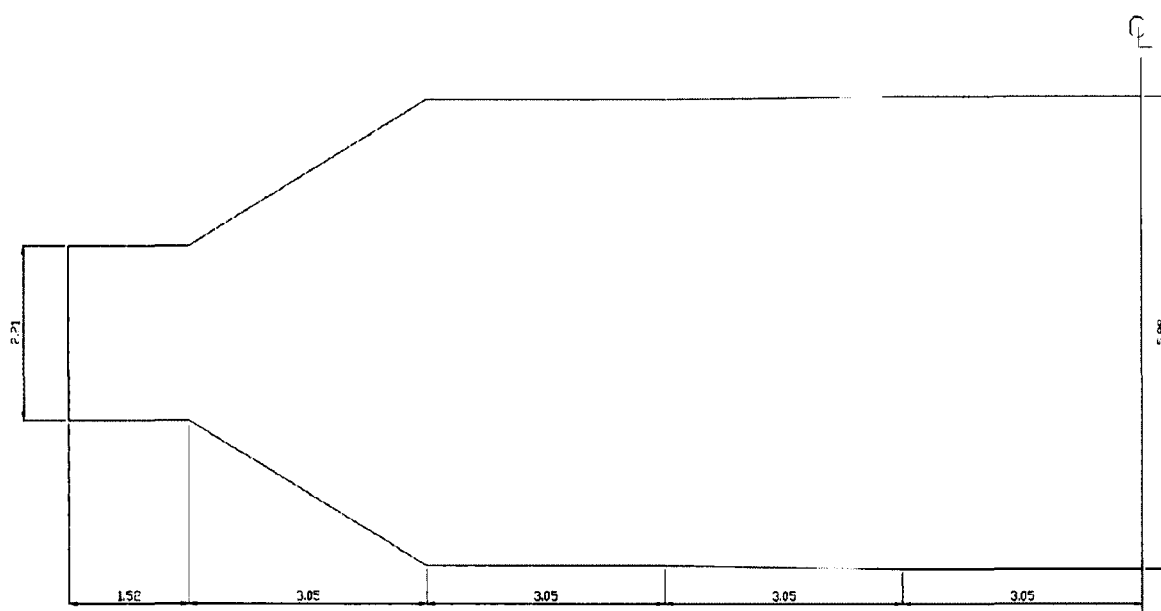
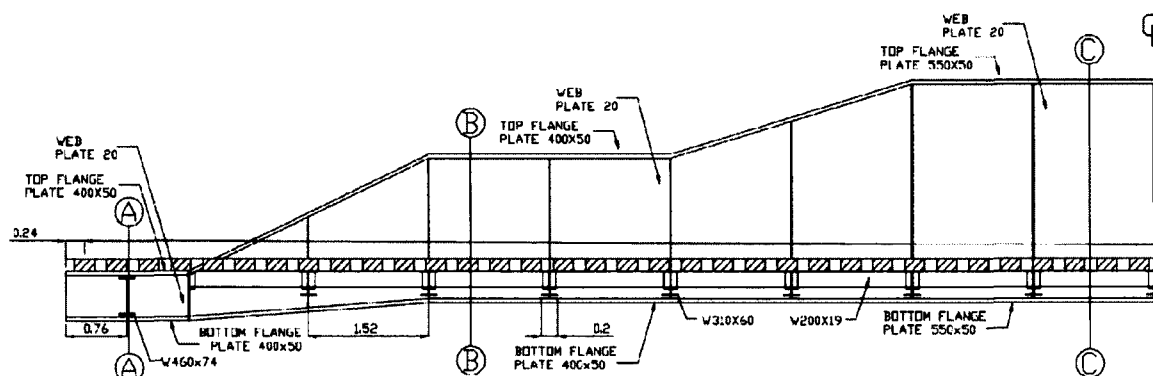


Figure 3.10: Pont à poutres latérales - Section C-C

En suivant la même logique que pour les deux types de ponts précédents, un assemblage de sections ayant trois profondeurs différentes peut être réalisé dans le cas d'une longue portée. Les figures 3.11 et 3.12 représentent la vue en élévation et en plan de cet assemblage..





**Figure 3.14: Pont à 4 poutres et pont à poutres latérales (27,432m) - Vue en plan de l'assemblage**

### 3.2.4 Pont à treillis latéraux

Le pont à treillis latéraux (*Truss Girder*) est ressemblé généralement au pont à poutres latérales puisque l'âme des poutres longitudinales y est remplacée par un treillis. Ce type de solution est généralement utilisé afin de diminuer la quantité de matériau. Par contre, pour un pont mobile, c'est davantage le nombre de connexions à assembler directement sur le site qui régit le type de section. Afin de faciliter les connexions, des sections de treillis indépendantes ont été élaborées. Malgré le nombre élevé de connexions que comporte un treillis, il est tout de même intéressant d'analyser si la solution est envisageable puisque certaines connexions pourront être complétées à l'usine, préalablement à leur transport.

### Section

Plusieurs types de treillis peuvent être utilisés pour remplacer les âmes. Les figures 3.15 à 3.19 illustrent la section transversale et l'élévation de cinq possibilités. La superposition de treillis identiques peut donner sensiblement le même résultat que l'augmentation de la profondeur des poutres principales d'un pont à poutres latérales. En gardant le même système transversal, des sections de 9,144m (30pi) ont été analysées telles qu'illustrées aux figures 3.20 à 3.22.

En superposant les treillis, la hauteur de l'ouvrage devient considérable et problématique pour le déversement latéral. Bien que le premier treillis puisse être retenu à l'aide de cornières, le second et le troisième doivent également être soutenus. Des câbles sont donc utilisés pour fixer les extrémités supérieures de ceux-ci. Les poutres transversales sont donc allongées vers l'extérieur pour retenir l'autre extrémité des câbles. Ce prolongement augmente alors la largeur du tablier à 8,5m.

Pour limiter cette augmentation, diverses sections de treillis de 6m de longueur ont été dimensionnées. Les dimensions des profilés et la largeur des treillis sont sensiblement les mêmes pour l'ensemble des possibilités. Les types de connexion ont été choisis afin qu'ils soient efficaces et faciles à réaliser. Bien que, dans certains cas, ces types de connexion soient non conventionnels, ils permettent tous un bon drainage des profilés d'acier.

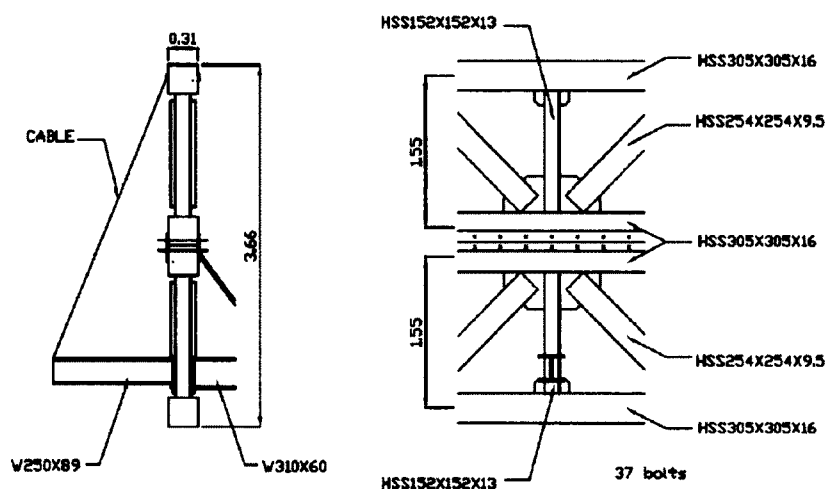


Figure 3.15: Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Possibilité no.1

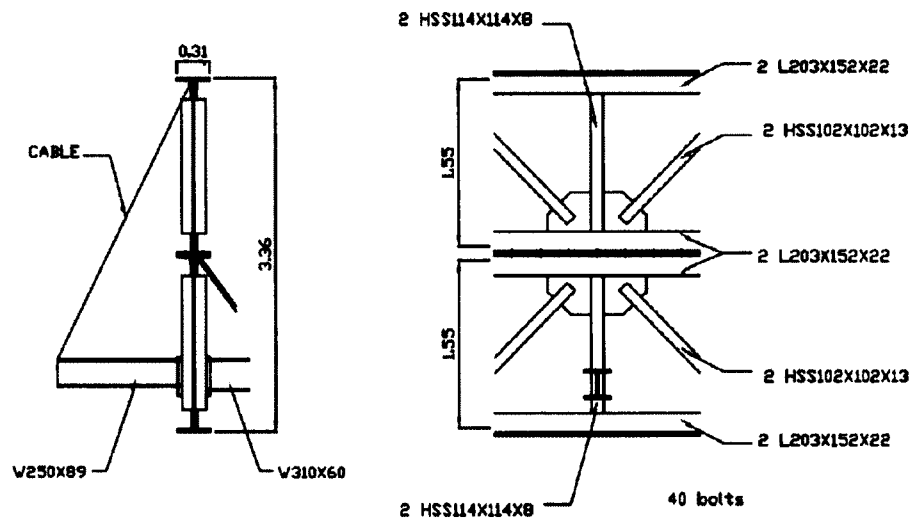


Figure 3.16: Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Possibilité no.2

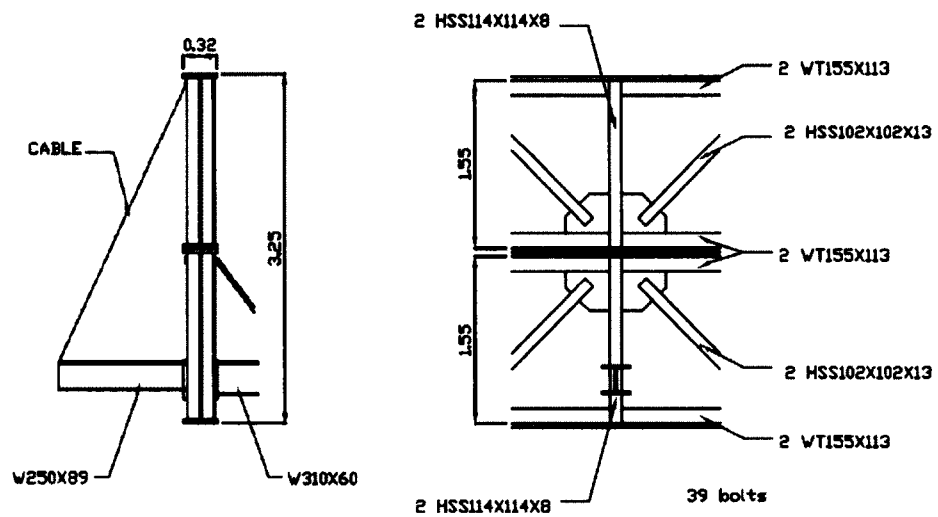


Figure 3.17: Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Possibilité no.3



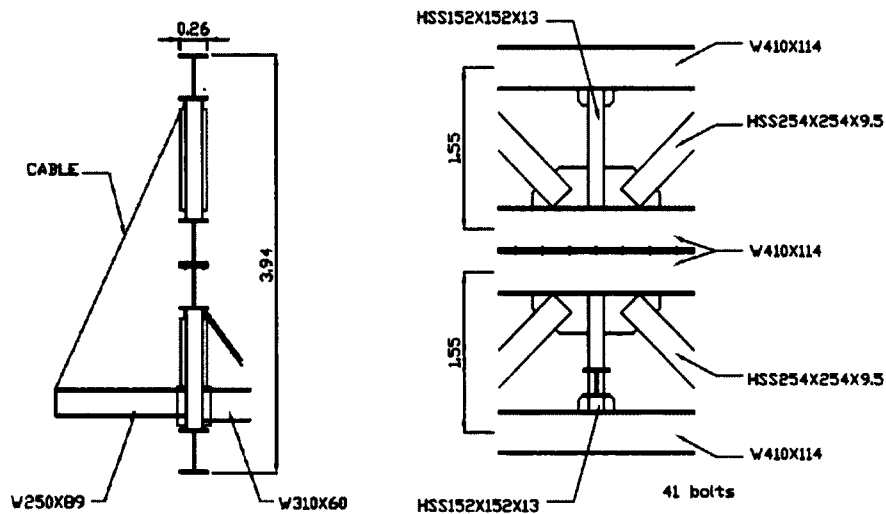


Figure 3.18: Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Possibilité no.4

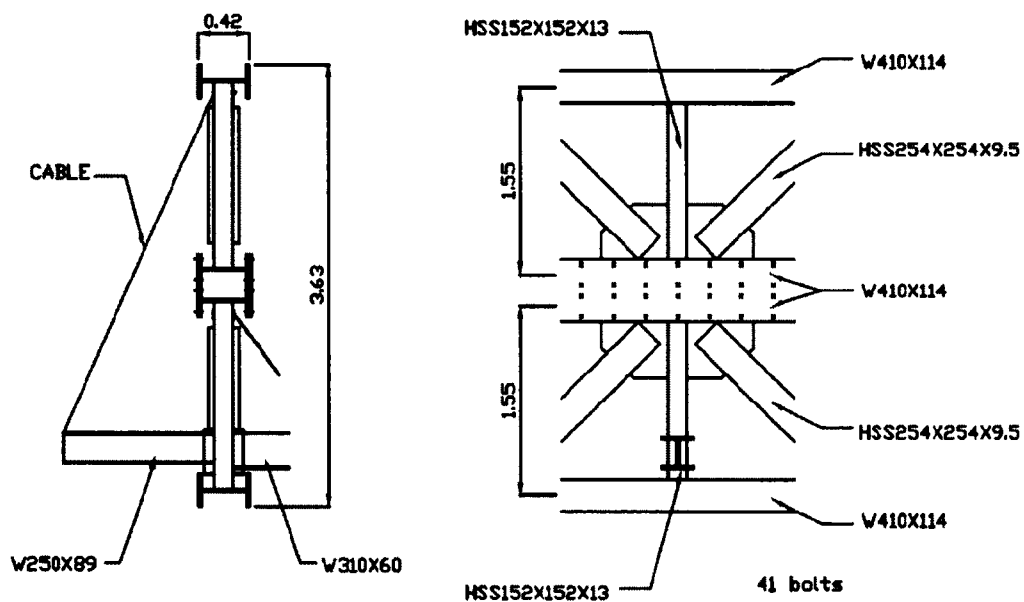


Figure 3.19: Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Possibilité no.5

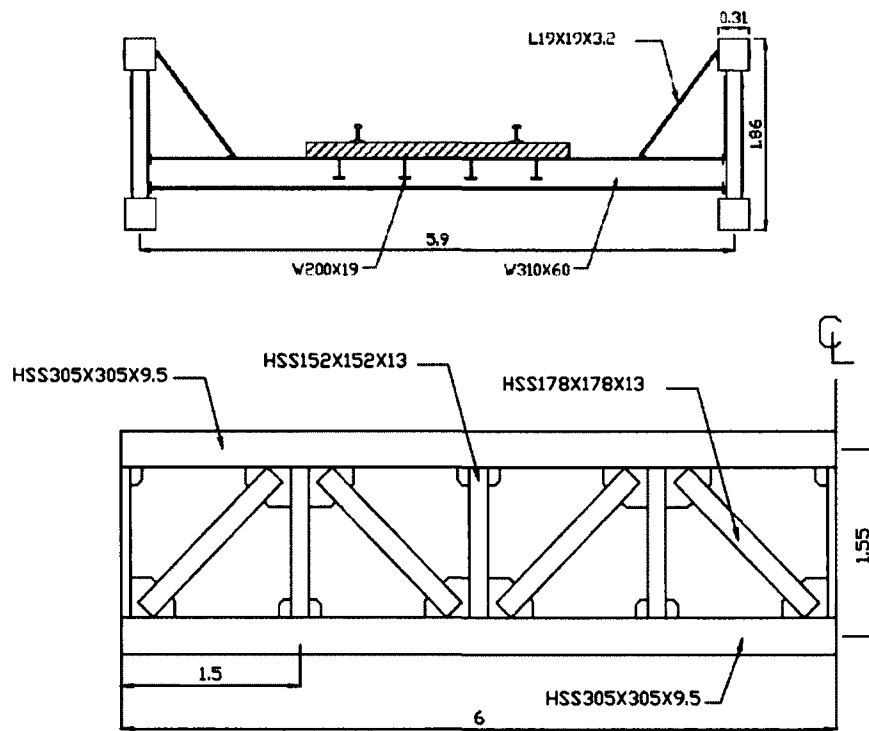


Figure 3.20: Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Section A-A

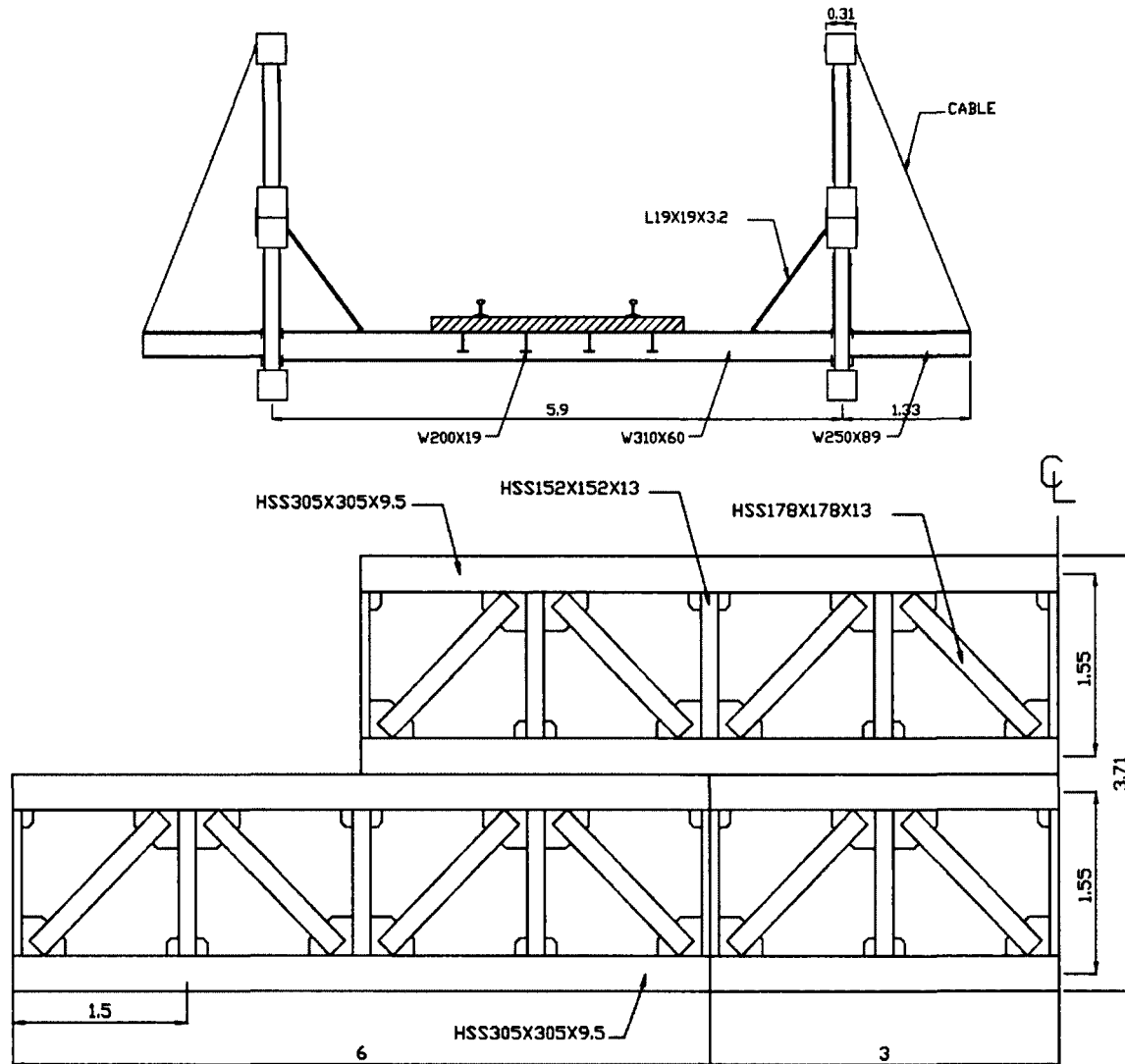


Figure 3.21: Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Section B-B

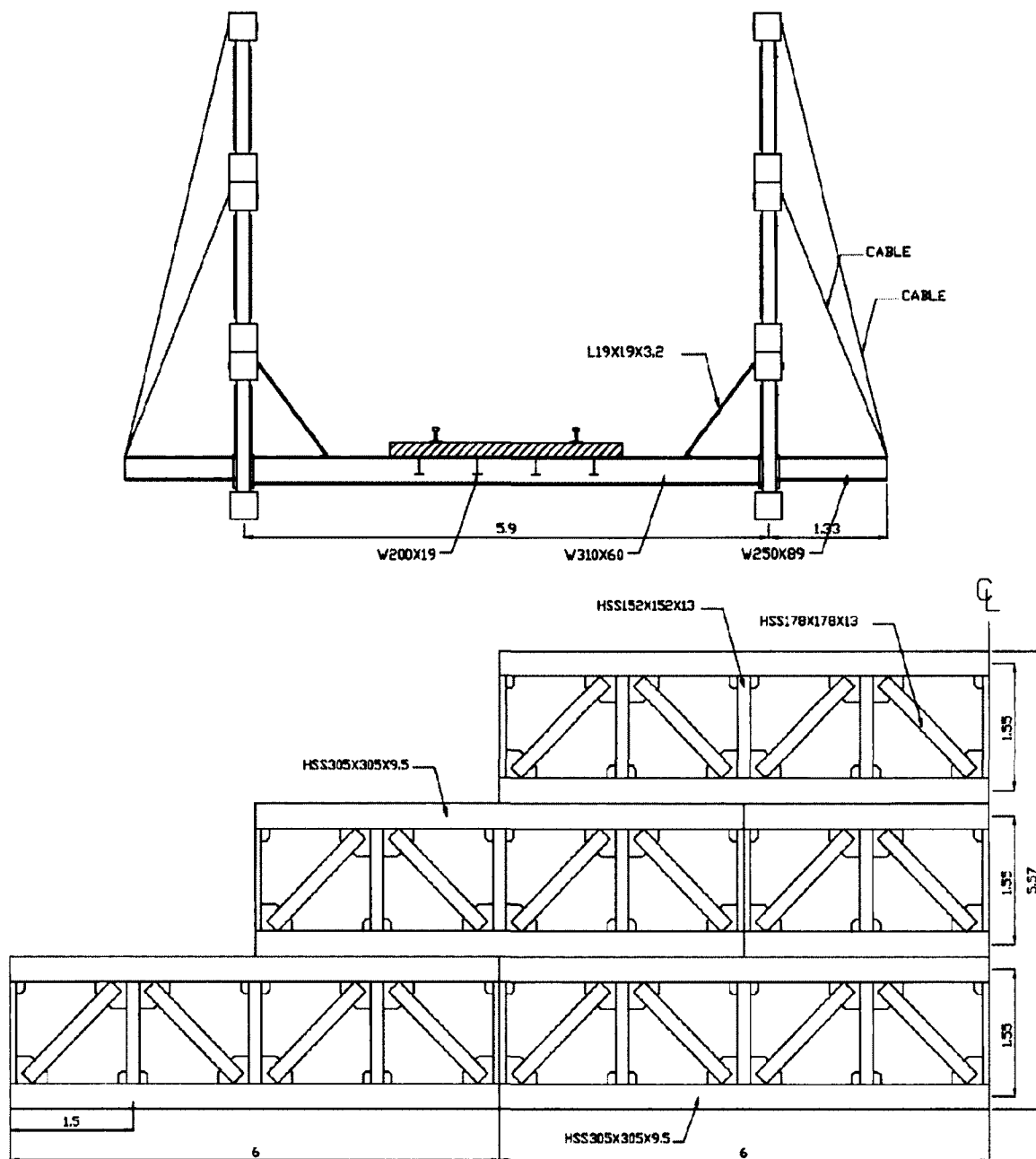


Figure 3.22: Pont à treillis latéraux - Section et élévation - Section C-C

### 3.2.5 Pont à treillis fermé

Le pont à treillis fermé (*Through Truss*) permet généralement de diminuer la quantité d'acier nécessaire à la construction d'un ouvrage ayant une grande portée. La construction est plus imposante puisque les treillis longitudinaux sont retenus latéralement à leur extrémité supérieure par un profilé en « I », en « C » ou tubulaire installé au dessus de l'aire réservée à

la circulation ferroviaire. Pour permettre le contreventement au dessus de cette aire, l'utilisation de poutres plus profondes devient donc nécessaire, bien que la capacité requise pour résister aux efforts demeure la même. L'usage de grand treillis est préférable puisqu'elle permet de diminuer la quantité d'acier.

### Section

Cette alternative a l'apparence d'un treillis à trois dimensions dans lequel circulera le train. En plus d'être retenues à la base et au sommet des treillis latéraux, des sections en forme de « X » sont installées le long de la structure afin d'en assurer la stabilité. La figure 3.23 illustre la section transversale alors que la figure 3.24 présente une vue en plan de ce type de ponts.

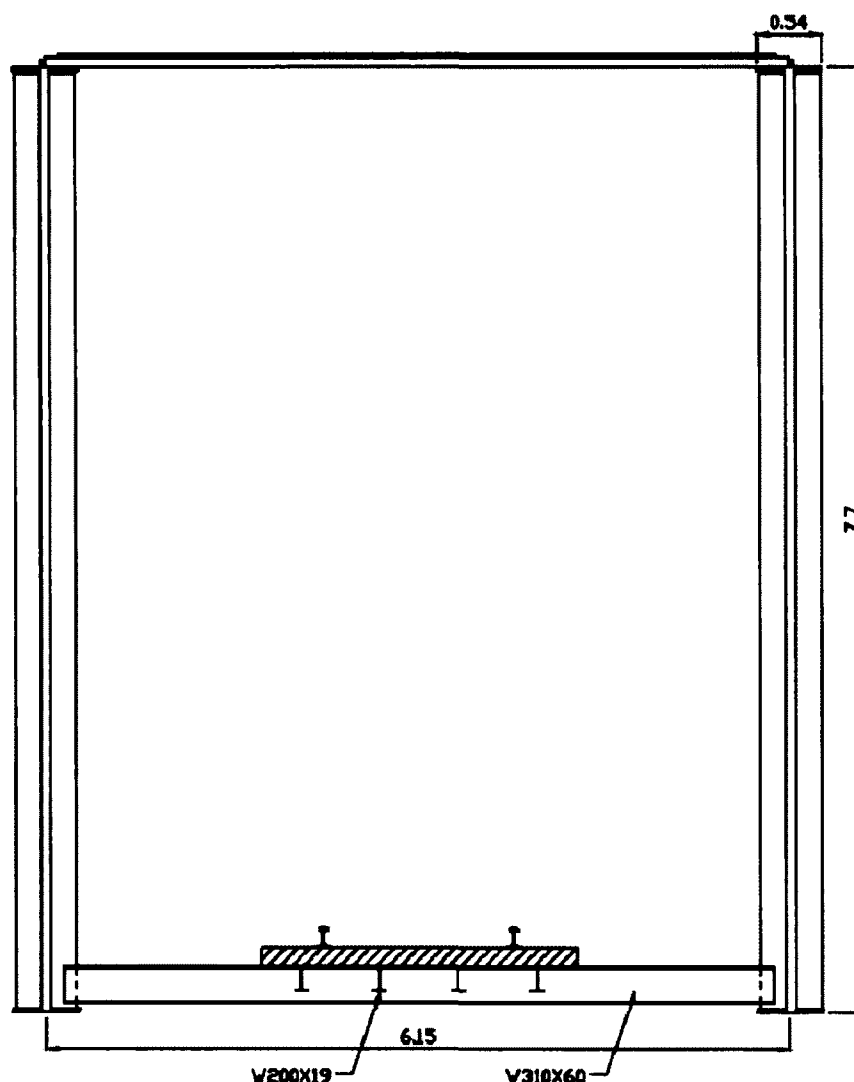


Figure 3.23: Pont à treillis fermé (27,432m) - Section transversale

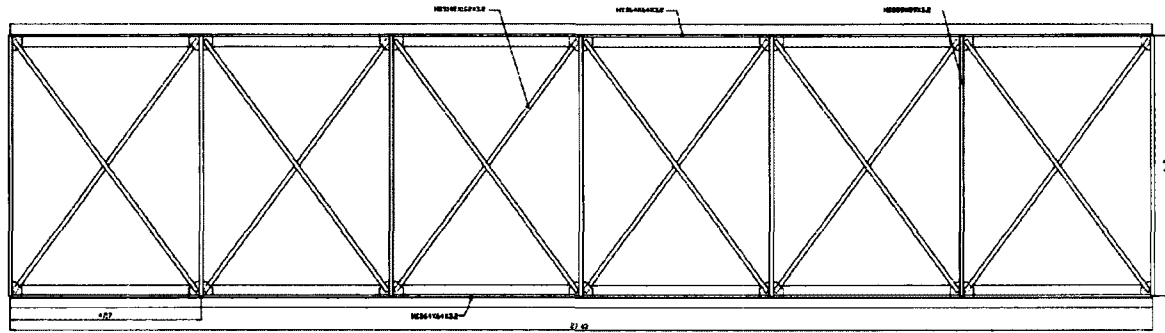


Figure 3.24: Pont à treillis fermé (27,432m) – Vue en plan

### 3.3 Résumé

#### 3.3.1 Analyse

Chaque type de ponts est analysé sommairement afin de retenir trois choix qui sont étudiés davantage à l'étape de l'étude préliminaire.

##### **Pont poutres**

L'utilisation de sections combinées pour de longues portées favorise la diminution de l'épaisseur du tablier. Cette alternative résout partiellement le problème de variation de la hauteur des appuis existants grâce à l'élaboration de trois profondeurs de poutres. Lorsque le dégagement vertical sous le tablier est critique, l'utilisation d'un autre type d'ouvrage est préférable en raison de la grande profondeur des poutres.

##### **Pont bi-poutres**

La profondeur des poutres longitudinales de ce type de pont est supérieure à celles des tabliers à plusieurs poutres. Malgré cela, la quantité totale de matériau requis est inférieure pour les ponts bi-poutres, diminuant ainsi le coût total de l'ouvrage. De plus, le nombre de connexions étant inférieur, son délai de construction y est plus court.

Ce type d'ouvrage constitue une option qui pourrait être utilisée dans le cadre de ce projet puisque sa mise en place est facile et rapide. Cette alternative est donc analysée plus en profondeur dans l'étude préliminaire.

**Pont à poutres latérales**

Malgré que la largeur du tablier du pont à poutres latérales soit supérieure à celle du pont poutres, le peu d'espace requis sous ce type d'ouvrage rend cette alternative intéressante. Celle-ci est donc retenue et détaillée davantage à l'étape de l'étude préliminaire. Par contre, la possibilité d'assembler deux types de structure différents semble trop complexe pour être effectuée rapidement sur le terrain. Il est donc préférable d'utiliser un seul type de sections par site. Dans le cadre de ce projet, il faudra évaluer comment, dans certains cas, les sections d'extrémité pourront être modifiées.

Lors du calcul des connexions, une attention particulière à la géométrie devra être apportée puisque la distance est très restreinte entre la connexion nécessaire pour unir deux des trois sections et celle pour y fixer la cornière.

**Pont à treillis latéraux**

Assembler des sections identiques à la suite l'une de l'autre est la clé du succès des ponts mobiles. Bien que cette alternative soit loin d'être mise au point, elle permet toutefois d'entrevoir de nombreuses possibilités. Lors de l'étude préliminaire, l'optimisation du treillis sera donc réalisée.

L'ajout de câbles pour assurer la stabilité exige l'allongement du profilé d'acier transversal. Il faudra donc trouver une solution plus appropriée pour la stabilisation latérale. La connexion du système transversal est également à revoir afin de la simplifier et, surtout, d'en limiter le nombre.

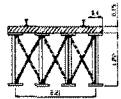
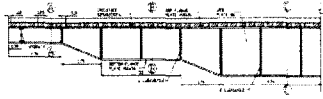

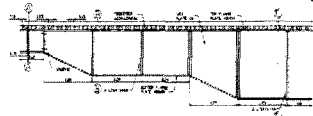

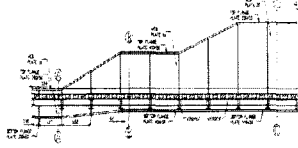
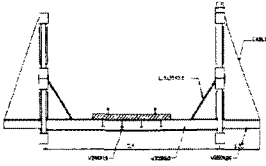
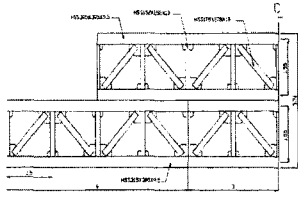
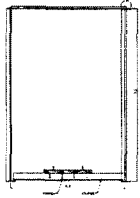
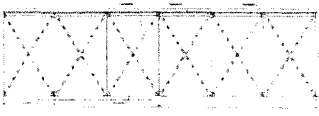
**Pont à treillis fermé**

Ce type de ponts présente un treillis aux dimensions imposantes. Dans le cadre de ce projet, le concept de pont ferroviaire mobile doit être adapté à diverses longueurs de portée. Puisqu'il s'agit d'une solution acceptable pour un pont de longue portée, mais très coûteuse pour de courte et moyenne portée, cette alternative est rejetée. Le nombre de connexions étant élevé et les dimensions des sections difficiles à manipuler, ce type de pont est inadéquat pour un pont mobile devant être transporté et érigé en moins de 48 heures.

## 3.1.2 Choix retenus

Le tableau 3.2 récapitule les différents avantages et inconvénients de chacune des solutions présentées dans ce chapitre. À la lumière de l'analyse précédente, les ponts bi-poutres, à poutres latérales et à treillis latéraux sont retenus pour l'étude préliminaire.

Tableau 3.1: Étude de concept - Résumé

Solution	Section	Élévation	Avantage	Inconvénient	Commentaire
Pont poutres			<ul style="list-style-type: none"> <li>Trois profondeurs d'appui</li> <li>Assemblage facile et rapide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessite beaucoup d'espace sous la voie (max. 2,44m)</li> <li>Ajustement en longueur limité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessite beaucoup de poutres dans un espace limité (espace restreint pour l'assemblage)</li> </ul>
Pont bi-poutres			<ul style="list-style-type: none"> <li>Trois profondeurs d'appui (0,92m, 1,83m et 2,75m)</li> <li>Assemblage facile et rapide</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessite beaucoup d'espace sous la voie (max. 5,34m)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nécessite moins d'acier que la solution de pont poutres</li> <li>Délais de construction inférieurs à celui d'un pont poutres (moins de connexions)</li> </ul>
Pont à poutres latérales			<ul style="list-style-type: none"> <li>Beaucoup d'espace libre sous la voie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grande largeur du tablier (nécessite trois sections)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Peut être combiné à un autre type de structure aux extrémités du pont (complexe)</li> </ul>
Pont à treillis latéraux			<ul style="list-style-type: none"> <li>Beaucoup d'espace libre sous la voie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grande largeur du tablier (nécessite trois sections)</li> <li>Élargissement de la structure afin d'assurer la stabilité latérale (ancrage des câbles)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plusieurs possibilités de treillis différents</li> <li>Le treillis peut être assemblé à l'entrepôt</li> </ul>
Pont à treillis fermé		 Vue en plan	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beaucoup d'espace libre sous la voie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fortes dimensions des sections (difficultés de manipulation)</li> <li>Nombreuses connexions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Solution préconisée pour de grandes portées</li> </ul>





## CHAPITRE 4 ÉTUDE PRÉLIMINAIRE

Une discussion avec les experts du CN quant aux cinq possibilités de l'élaboration du concept a permis de faire ressortir les points forts et faibles de chacune d'entre elles. Par la suite, une étude préliminaire a permis d'effectuer certaines modifications et surtout de vérifier si chacune des alternatives pouvait être réalisée géométriquement. La grosseur des sections a été optimisée et les méthodes d'érection peaufinées. Les ponts bi-poutres, à poutres latérales et à treillis latéraux ont été retenus et sont définis plus en détail dans ce chapitre. Les plans sont disponibles à l'annexe C.

### 4.1 Amélioration du concept

#### 4.1.1 Portée

Au cours de cette consultation, de nombreuses hypothèses ont été confirmées. Afin de limiter le nombre d'alternatives, mais également celui des sections préfabriquées à entreposer, un seul et même type de structure doit pouvoir être utilisé pour toutes les longueurs de portée. Sur l'ensemble du territoire du CN, les portées varient de 5 à 28m. Chacune de ces valeurs est considérée dans cette phase du projet.

#### 4.1.2 Traverses

De nombreuses sections de bois peuvent être utilisées comme traverse. Par contre, les dimensions les plus accessibles sur le marché sont celles ayant une section transversale de 25X25cm (10x10po) et une longueur de 2,61m. Les dimensions des traverses doivent donc être adaptées à ces dimensions.

#### 4.1.3 Ajustement en longueur

Puisque les culées existantes seront réutilisées, la possibilité de modifier la longueur des sections est nécessaire. Après réflexion et discussion avec les représentants du CN, il semble plus simple d'ajuster la section d'extrémité sur le site, en coupant celle-ci à la longueur désirée. Pour permettre un transfert adéquat des efforts et assurer la stabilité de la superstructure, des raidisseurs d'extrémité supplémentaires devront être ajoutés. Ceux-ci favoriseront l'ajustement en longueur du tablier en permettant de couper la section d'extrémité entre ces raidisseurs. Ces derniers devront avoir une capacité suffisante pour résister aux

réactions d'appui. En fixant à 0,5m l'espacement entre les raidisseurs des sections d'extrémité, la longueur de la portée pourra ainsi être ajustée de 1m.

#### 4.1.4 Ajustement en profondeur

Un maximum de trois profondeurs semble suffisant pour ajuster en profondeur la superstructure. En consultant les données fournies par le CN (tableau 2.9), les profondeurs ont été optimisées et fixées à 0,75m, 1,15m et 2,1m pour le pont bi-poutres et à 0,85m pour les ponts à poutres latérales et à treillis latéraux. Ces valeurs correspondent à la distance entre le dessous du patin du rail et le dessus de l'appareil d'appui.

### 4.2 Solutions

#### 4.2.1 Pont bi-poutres

Suite à l'étude de concept, un calcul détaillé des efforts sur les sections et les connexions a été effectué. Afin de permettre un bon assemblage géométrique, les dimensions des poutres ont été légèrement modifiées. Puis, l'espacement entre chaque système transversal a été optimisé. Des dimensions de section ont été déterminées afin de permettre l'utilisation de ce type de ponts pour l'ensemble des portées. Une configuration pour chacune d'entre elles a finalement été mise sur papier pour faciliter l'assemblage des sections par les futurs utilisateurs. Cette solution consiste en un ensemble de pièces devant être assemblées en 24 heures et dont l'assemblage peut s'adapter à des portées de 5 à 28m. Les dimensions de ces pièces principales ainsi que leur assemblage sont définies dans cette section du chapitre.

#### Sections

Les figures 4.1 à 4.6 illustrent les sections transversales des sections d'extrémité. Celles-ci ont une hauteur variant entre 0,5m et 2,85m. Les figures 4.7 à 4.17 présentent les sections de profondeurs constantes. Afin de reprendre le moment fléchissant maximal, la profondeur maximale du tablier est située à mi-portée. Les diverses sections sont assemblées à l'aide de plaques d'acier et de boulons. Le tableau 4.1 fournit les dimensions des plaques constituant les poutres longitudinales de l'ensemble des sections. Il indique également le nombre de sections qu'il faudra entreposer pour être en mesure de réaliser tous les types d'assemblage et ainsi pouvoir remplacer tous les tabliers de 5 à 28m de portée. La capacité des poutres et la longueur de portée maximale que celles-ci peuvent supporter y sont aussi présentées. Les

sections A à C sont des sections d'extrémité et leur profondeur varie d'un angle approximatif de 30 degrés afin de permettre la réutilisation des appuis existants alors que les sections D à G ont une profondeur constante.

Tableau 4.1: Pont bi-poutres - Dimensions des plaques pour chaque section

Section	Longueur m	Plaque des semelles mm	Plaque d'âme mm	Capacité*		Longueur de portée max m	Nombre de sections
				Effort tranchant kN	Moment fléchissant kN.m		
A	2,5	510X30	840X22	2260	5120	21	4
A-2	3	510X30	840X22	2260	5120	21	4
B	3	510X30	1790X22	4820	10 720	>28	4
B-2	3	510X30	1790X22	4820	10 720	>28	4
C	3,5	510X30	2790X22	7510	16 610	>28	4
C-2	3,5	510X30	2790X22	7510	16 610	>28	4
D	3	510X30	840X22	2260	5120	21	2
D-2	3	510X30	1790X22	4820	10 720	>28	6
D-3	3	510X30	2790X22	7510	16 610	>28	6
E	4	510X30	840X22	2260	5120	21	2
E-2	4	510X30	1790X22	4820	10 720	>28	6
E-3	4	510X30	2790X22	7510	16 610	>28	10
F-2	5	510X30	1790X22	4820	10 720	>28	2
F-3	5	510X30	2790X22	7510	16 610	>28	2
G	2	510X30	840X22	2260	5120	21	2
G-2	2	510X30	1790X22	4820	10 720	>28	2
G-3	2	510X30	2790X22	7510	16 610	>28	2
Total						66	

\*Des exemples de calcul sont présentés aux annexes A.2.2 et A.2.3

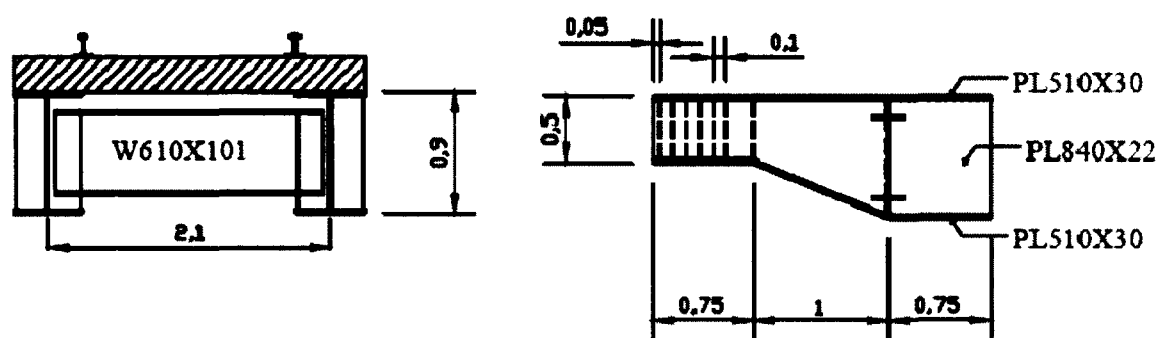


Figure 4.1: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section A

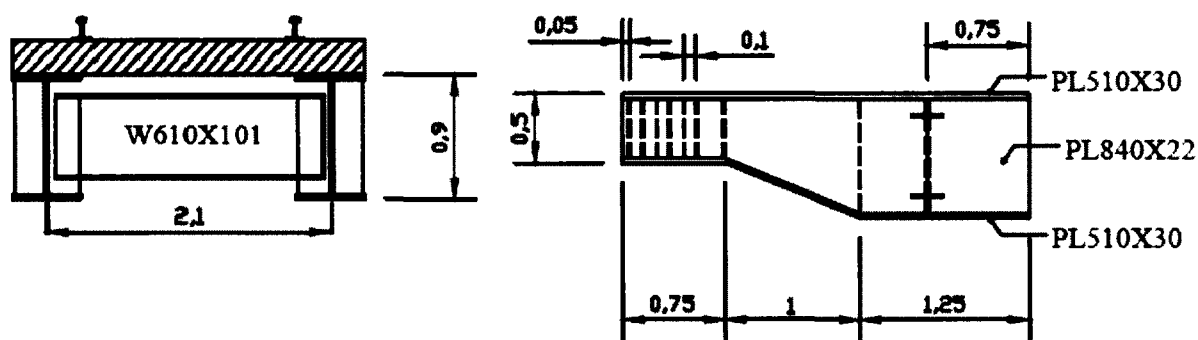


Figure 4.2: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section A-2

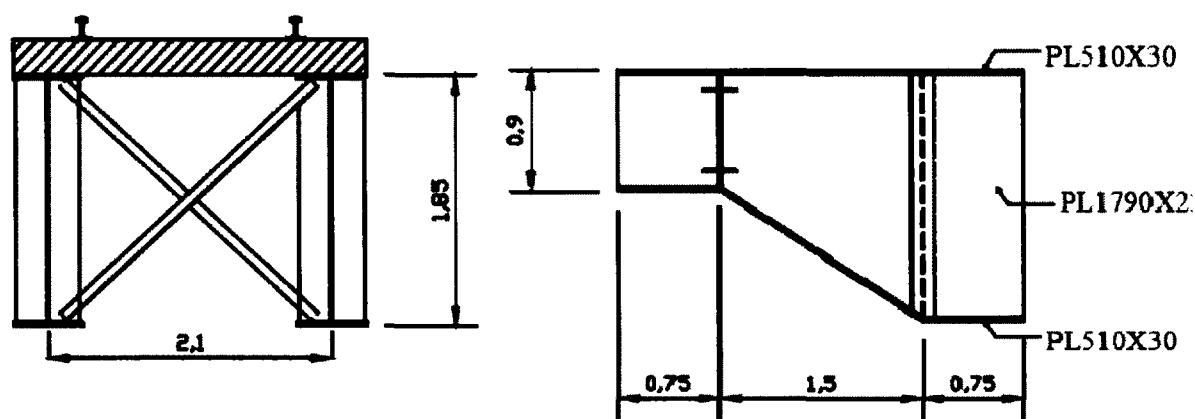


Figure 4.3: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section B

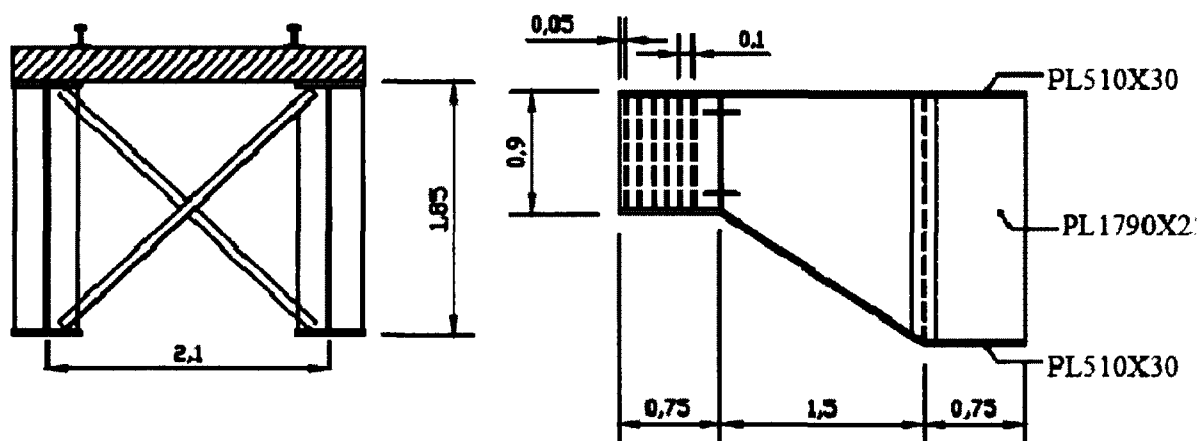


Figure 4.4: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section B-2

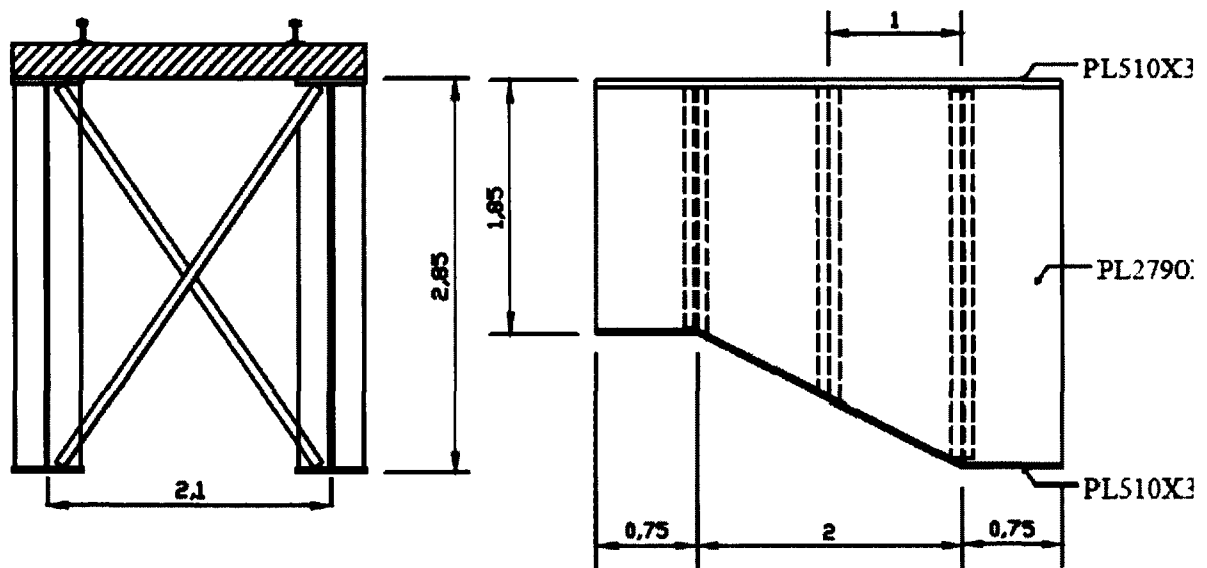


Figure 4.5: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section C

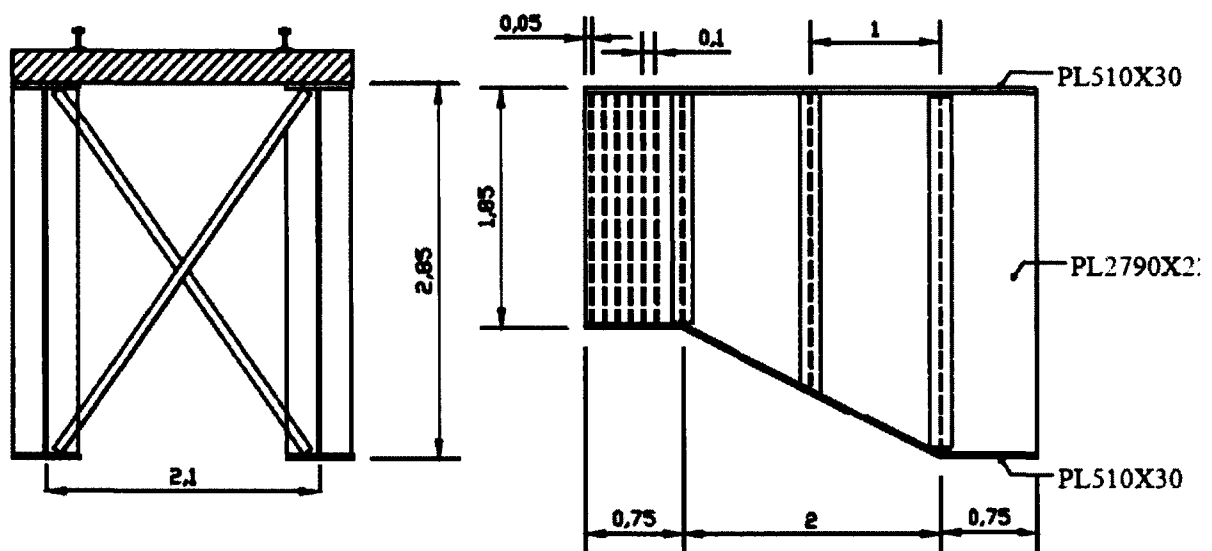


Figure 4.6: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section C-2

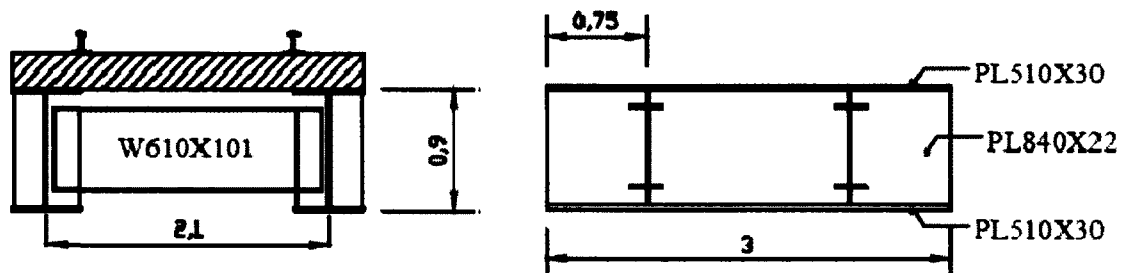


Figure 4.7: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section D

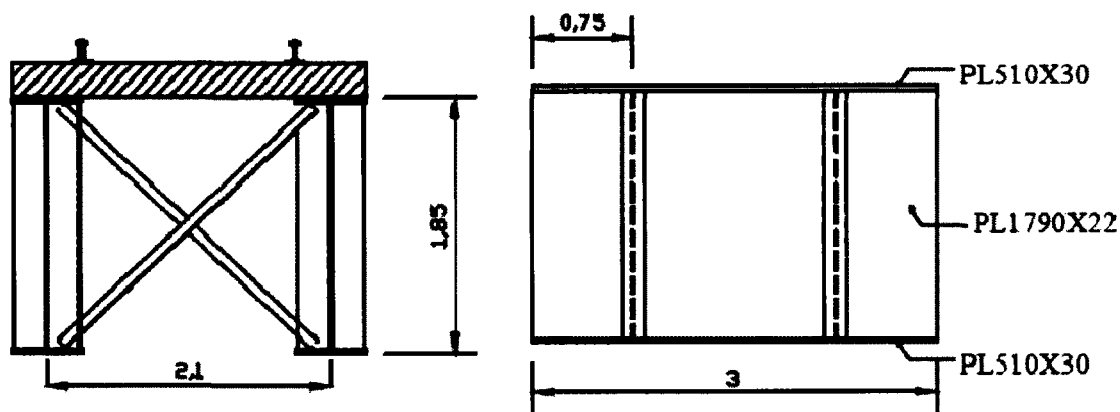


Figure 4.8: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section D-2

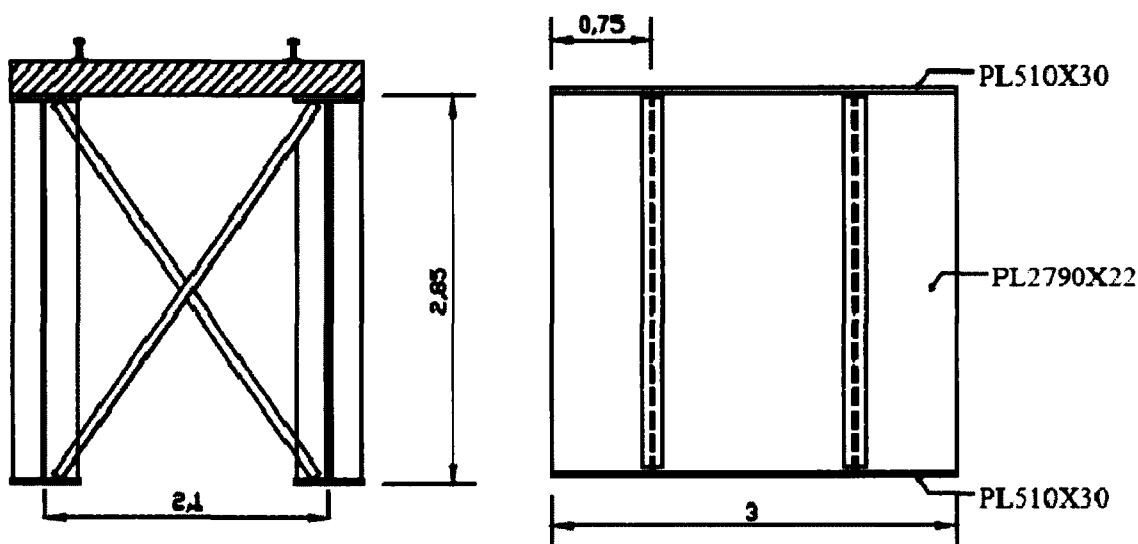


Figure 4.9: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section D-3

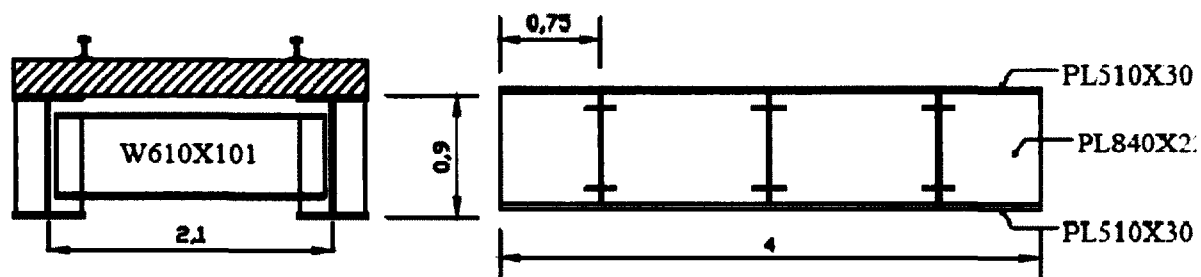


Figure 4.10: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section E

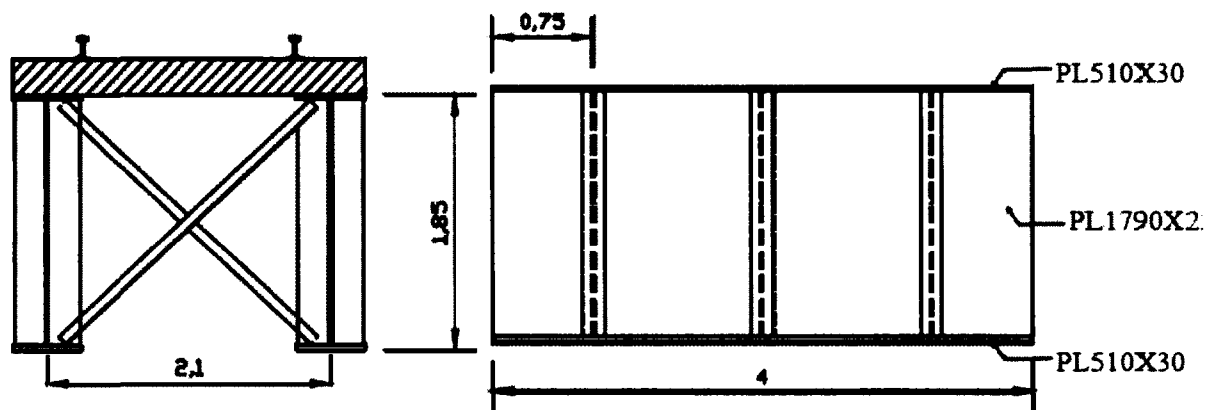


Figure 4.11: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section E-2

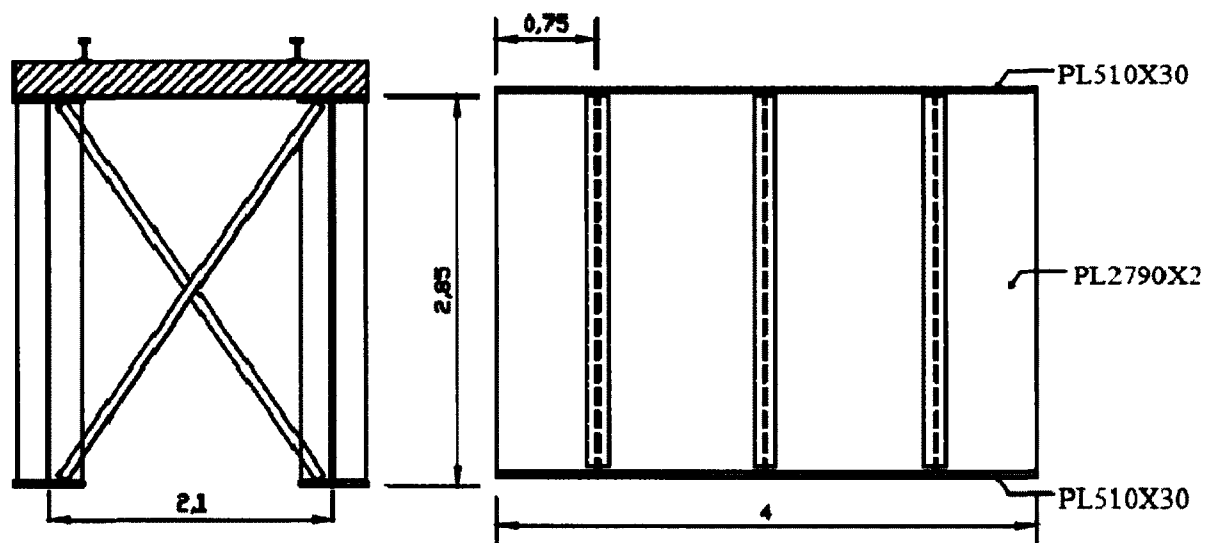


Figure 4.12: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section E-3

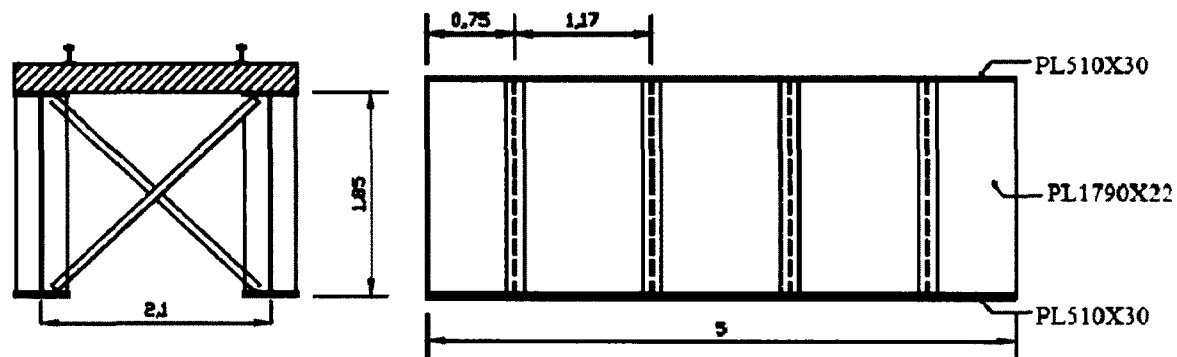


Figure 4.13: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section F-2



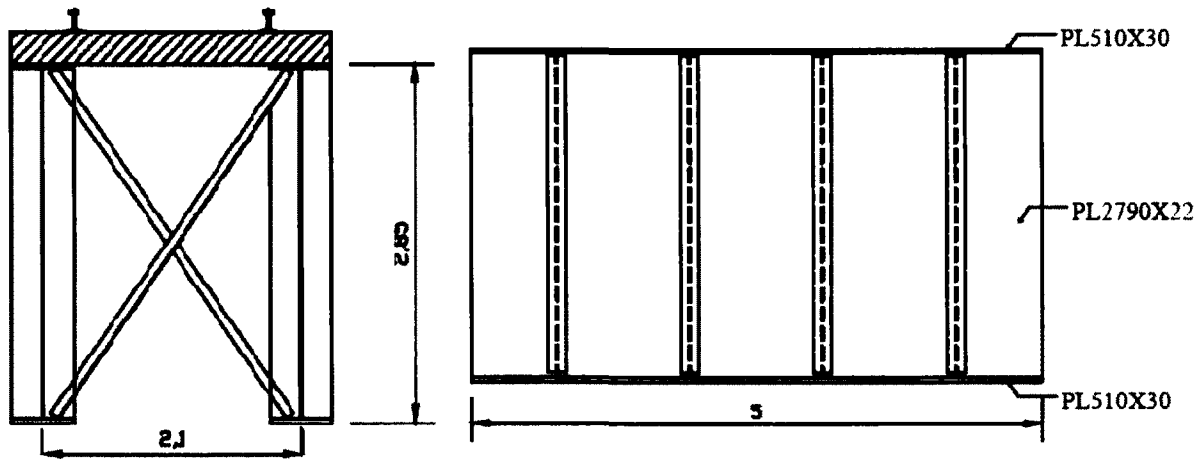


Figure 4.14: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section F-3

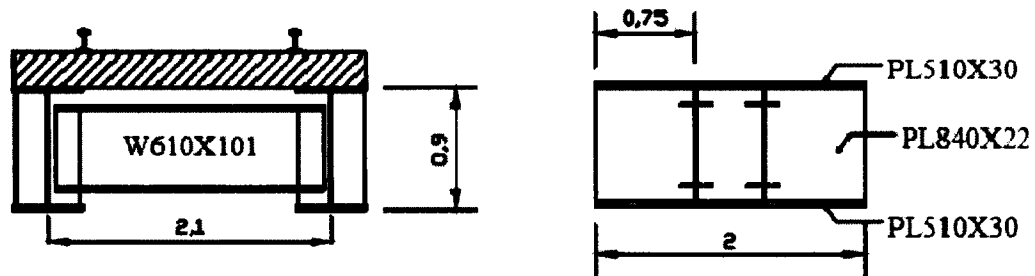


Figure 4.15: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section G

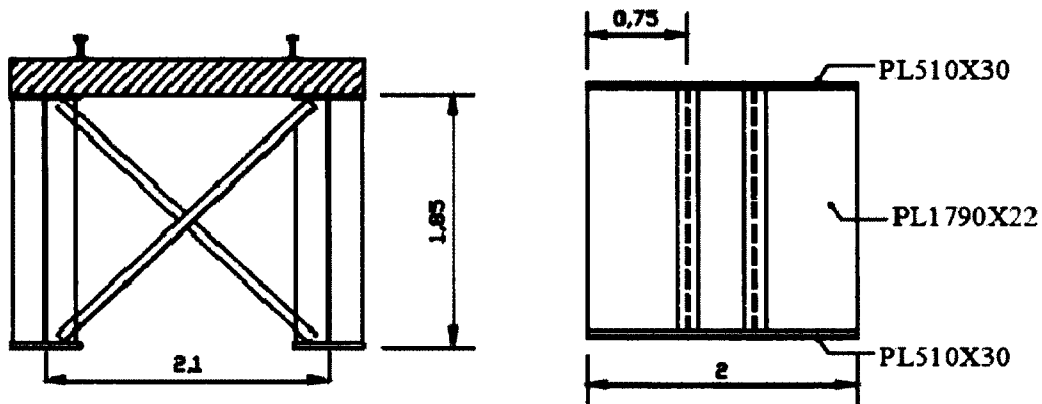


Figure 4.16: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section G-2

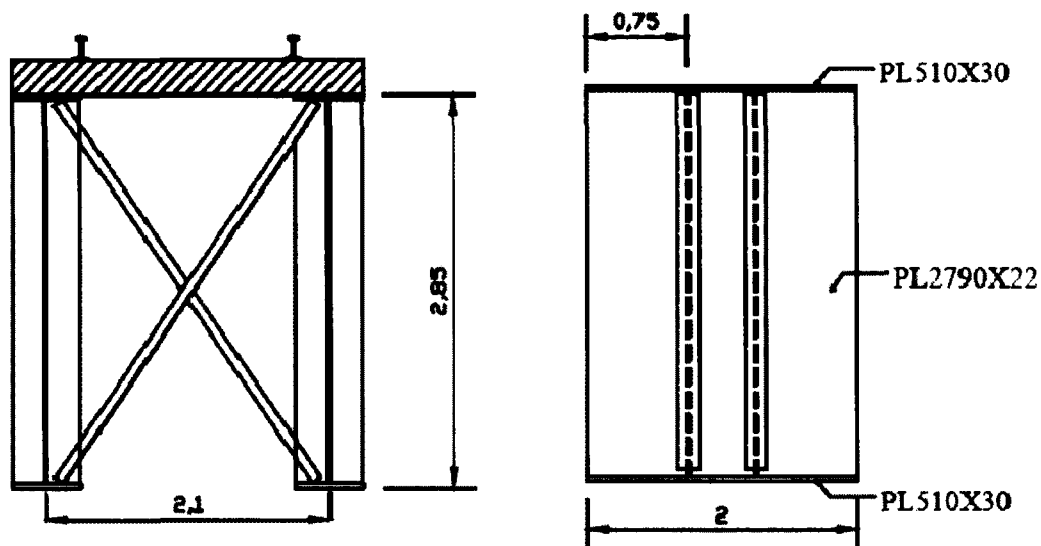


Figure 4.17: Pont bi-poutres - Section transversale et élévation - Section G-3

### Ajustement en longueur

Bien que le dimensionnement préliminaire soit effectué pour des portées de 5 à 28m, les sections d'extrémité ont été conçues afin de permettre la coupe de celles-ci aux 100mm (4po) près; ces sections sont donc ajustables en longueur. Puisque la distance entre les raidisseurs d'extrémité est de 100mm (4po), il sera possible d'ajuster chaque section jusqu'à une longueur de 500mm. La figure 4.18 illustre les possibilités d'ajustement de la section A.

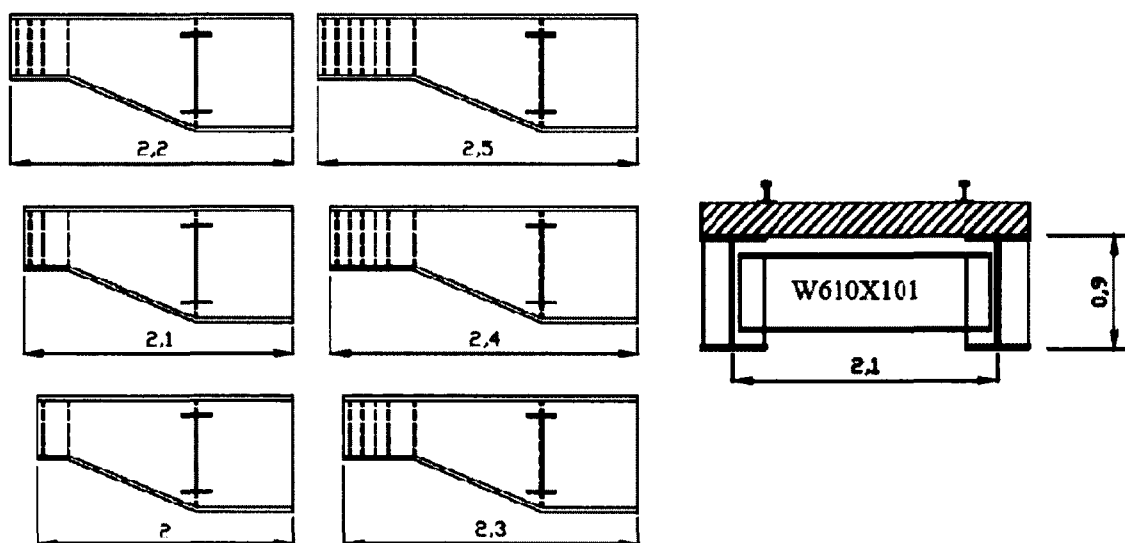


Figure 4.18: Pont bi-poutres - Ajustement de la longueur - Section A

### Système transversal

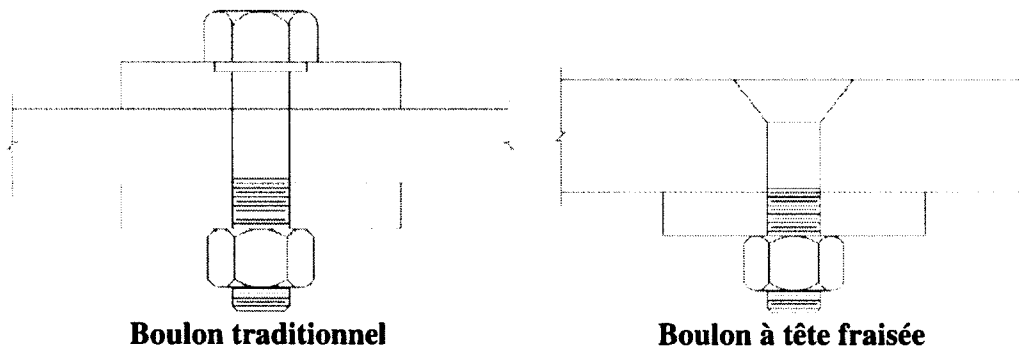
Le type de système transversal varie selon la profondeur de la poutre longitudinale. Il est constitué d'un profilé en « I » pour les tabliers de faible profondeur ou, pour les autres profondeurs, de cornières, dos-à-dos, installées en forme de « X »; ce qui requiert une moins grande quantité d'acier. De plus, afin d'assurer le transfert du moment dans la poutre longitudinale, un raidisseur est installé à chaque changement de profondeur de celle-ci. Le tableau 4.2 présente les dimensions des plaques des raidisseurs et les profilés correspondant au système transversal.

**Tableau 4.2: Pont bi-poutres - Sections utilisées pour les raidisseurs et le système transversal**

Élément	Longueur m	Section
Poutres transversales	1,8	W610X101
Cornières transversales	Variée	2 L76X76X4,8
Raidisseurs d'extrémité	Variée	2 PL250X25
Raidisseurs intermédiaires	Variée	2 PL250x25

### Connexions

La connexion des sections est composée de plaques d'acier et de boulons traditionnels ayant un diamètre de 38,1mm (1½po). Des boulons à tête fraisée (*countersunk bolts*), ayant un diamètre de 25,4mm (1po), sont utilisés pour la connexion des traverses. Cette distinction de diamètres facilitera la manutention des boulons. L'utilisation de boulons à tête fraisée permet de diminuer l'interaction de ceux-ci avec la traverse de bois. La figure 4.19 illustre les deux types de boulon. Les connexions sont plus longues pour des boulons à tête fraisée que pour des boulons traditionnels puisque le nombre de plans de cisaillement est diminué de moitié.



**Figure 4.19: Types de boulon**

Les dimensions des plaques requises ainsi que leur emplacement sont énumérés dans le tableau 4.3. Leur capacité est définie au tableau 4.4. Les connexions Z, Y et W sont illustrées sur les plans apparaissant à l'annexe C.

Tableau 4.3: Pont bi-poutres - Plaques et boulons assurant la connexion

Connexion	Longueur m	Plaque des semelles	Plaque d'âme	Nombre de boulons	Section	Quantité
Z	1,4	2PL235X20	-	48	A et A-2	4
	0,81	2PL240X14 PL535X14	- -	60		
	0,32	-	2PL800X14	40		
Y	1,4	2PL235X20	-	48	B, B-2, D-2, E-2, F-2 et G- 2	8
	0,81	2PL240X14 PL535X14	- -	60		
	0,32	-	2PL1680X14	84		
W	1,4	2PL235X20	-	48	C, C-2, D-3, E-3, F-3 et G- 3	12
	0,81	2PL240X14 PL535X14	- -	60		
	0,32	-	2PL2560X14	128		

Tableau 4.4: Pont bi-poutres - Capacité des connexions\*

Connexion	Longueur m	Plaque	Capacité des boulons kN	Capacité des plaques Effort tranchant kN	Moment fléchissant kN.m
Z	1,4	2PL235X20	6410	-	1520
	0,81	2PL240X14 PL535X14	3560	-	2430
	0,32	2PL800X14	2370	2740	-
Y	1,4	2PL235X20	6410	-	2350
	0,81	2PL240X14 PL535X14	3560	-	1870
	0,32	2PL1680X14	4980	5760	-
W	1,4	2PL235X20	6410	-	4160
	0,81	2PL240X14 PL535X14	3560	-	3310
	0,32	2PL2560X14	7600	8780	-

\*Un exemple de calcul est présenté en annexe A.3

Tableau 4.5: Pont bi-poutres - Agencement en fonction de la portée

Portée	Section	Portée	Section
5	2A	19	2A-2&2B&2C/2B-2&2C&2D-3
6	2A-2	20	2A&2B&2C&G- /2B-2&2C&D-3&E-3
7	2A&G	21	2A&2B&2C&D- 3/2B-2&2C&2E-3
8	2A&D	22	2A&2B&2C&E- 3/2B-2&2C&2F-3
9	2A&E	23	2A&2B&2C&F- /2B-2&2C&2D-3&E- 3
10	2A-2&E	24	2A&2B&2C&2D- /2B-2&2C&D-3&2E- 3
11	2A&2B	25	2A&2B&2C&D- &E-3 /2B-2&2C&3E- 3/2C-2&2D-3&3E-3
12	2A-2&2B/2B-2&2D-2	26	2A&2B&2C&2E- /2B-2&2C&3D-3&E- 3/2C-2&D-3&4E-3
13	2A&2B&G-2/2B- 2&D-2&E-2	27	2A&2B&2C&3D- 3/2B-2&2C&2D- 3&2E-3/2C-2&3E-3
14	2A&2B&D-2/2B- 2&2E-2	28	2A&2B&2C&2D- &E-3/2B-2&2C&D- 3&3E-3/2C-2&4E- 3&f-3
15	2A&2B&E-2/2B- 2&3D-2		
16	2A&2B&F-2/2B- 2&2D-2&E-2		
17	2A&2B&2D-2/2B- 2&2E-2&D-2		
18	2A&2B&D-2&E- 2/2B-2&3E-2		

### Agencement

En raison de la grande gamme de portées (5 à 28m), plusieurs agencements de sections sont nécessaires. Le tableau 4.5 présente les agencements possibles tandis que la figure 4.20 illustre un exemple d'agencement. Toutes les possibilités sont illustrées sur les plans de l'annexe C.

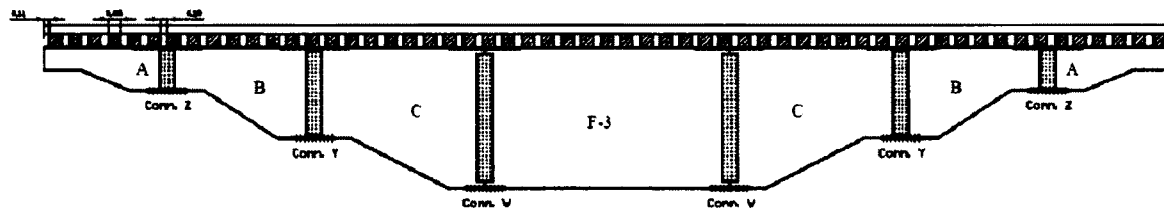


Figure 4.20: Pont bi-poutres - Agencement pour une portée de 23m

### Quantités

Pour comparer cette solution avec les autres alternatives, un calcul des quantités de matériau a été effectué. Ce calcul tient compte de l'inventaire minimal nécessaire pour permettre à l'entreprise de réagir en cas d'urgence, et ce, pour toute la gamme de portées étudiée. Ainsi, les tableaux 4.6 et 4.7 présentent les quantités nécessaires pour la réalisation d'un pont bi-poutres. La quantité d'acier comprend notamment celles des poutres longitudinales, du système transversal et des connexions de ceux-ci. Pour obtenir une estimation réaliste, le total des quantités inclus un 5% additionnel pour les détails qui seront dimensionnés lors de la conception détaillée.

Tableau 4.6: Pont bi-poutres - Quantités

Élément	Nombre	Matériau	Quantité tonne
Rails	2	Acier	0,27
Traverses	70	Bois	6,56
Poutres principales (pp)	2	Acier	255
Poutres transversales (pt)	22	Acier	5,51
Cornières transversales (ct)	60	Acier	4,18
Raidisseurs	420	Acier	31,4
Connexions des poutres	8	Acier	6,74
Boulons (pp)	3776	Acier	-
Boulons (pt)	1936	Acier	-
Boulons (ct)	1936	Acier	-
Plaques de connexion (pt)	44	Acier	0,65
Plaques de connexion (ct)	120	Acier	1,69

Tableau 4.7: Pont bi-poutres - Quantités de matériaux

Matériau	Quantité tonne
Acier	320
Bois	7
Boulons	7648

#### 4.2.2 Pont à poutres latérales

Le processus d'optimisation utilisé a été le même que celui du pont bi-poutres. Suite à l'étude de concept, l'espacement du système transversal a été revu et l'assemblage des sections a été défini pour considérer des portées de 6 à 28m. De plus, les cornières utilisées pour assurer la stabilité latérale des poutres longitudinales ont été remplacées par des raidisseurs en angle. Puisque les ponts à poutres latérales du CN ont ce type de raidisseur, leur mise en place risque d'être facilitée.

#### Sections

Le pont à poutres latérales est composé de cinq types de section. La figure 4.21 illustre une section transversale de ce type de pont alors que la figure 4.22 présente la vue en élévation de l'ensemble des sections. Chaque section est constituée de deux poutres principales reliées par un système transversal. La section E a une longueur d'âme supérieure aux autres sections puisqu'elle est utilisée, pour reprendre le moment fléchissant maximal, au centre des ponts de longue portée. Les dimensions de chacune des plaques ainsi que la capacité de chacune des poutres sont indiquées au tableau 4.8. Pour chacune des sections, la longueur de portée maximale y est également inscrite.

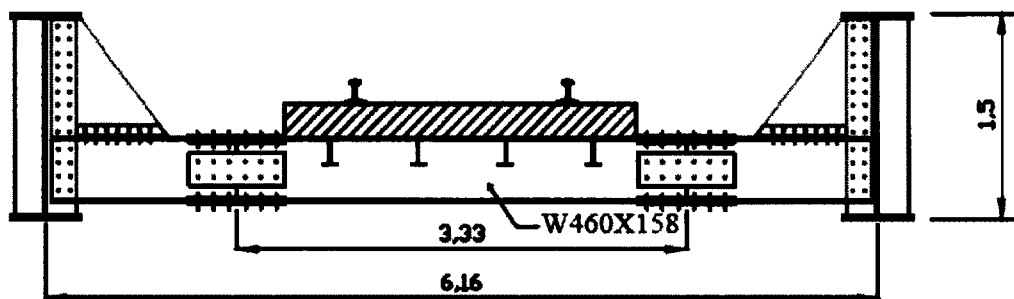
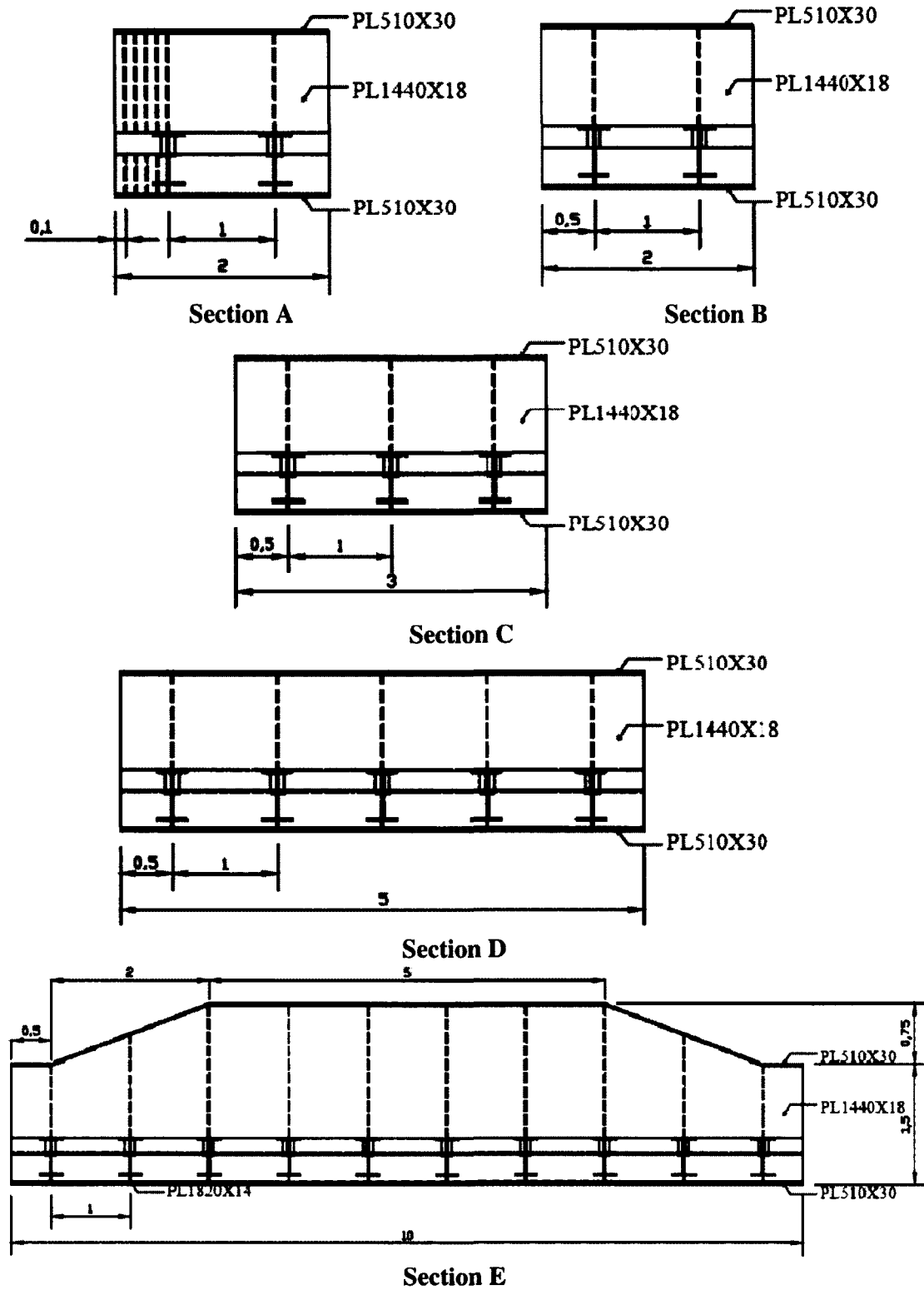


Figure 4.21: Pont à poutres latérales - Section transversale



**Figure 4.22: Pont à poutres latérales - Sections**



Tableau 4.8: Pont à poutres latérales - Dimensions des plaques pour chaque section

Section	Longueur m	Plaque des semelles mm	Plaque d'âme mm	Capacité*		Longueur de portée max m	Nombre de sections
				Effort tranchant kN	Moment fléchissant kN.m		
A	1	510X30	1440X18	3170	8300	27	4
B	2	510X30	1440X18	3170	8300	27	4
C	3	510X30	1440X18	3170	8300	27	4
D	5	510X30	1440X18	3170	8300	27	4
E	10	510X30	2190X18	4820	12 720	>28	2
						Total	18

\*Des exemples de calcul sont présentés aux annexes A.2.2 et A.2.3

### Ajustement en longueur

Tout comme pour les sections d'extrémité des ponts bi-poutres, la section A peut être coupée afin de l'ajuster à des longueurs variant de 100mm (4po).

### Système transversal

Les poutres transversales sont espacées, centre à centre, de 1m (3.28pi). La largeur du système transversal est constante pour chacune des sections. Ceci permet de faciliter l'installation du pont puisque, avant même le transport des sections, les traverses de bois peuvent être fixées aux longerons et la partie centrale, préassemblée. Il est donc possible de transporter chacune des sections en deux (une partie latérale assemblée avec une connexion rigide au système transversal et l'autre partie latérale) ou trois sections. La figure 4.23 représente ces trois sections.

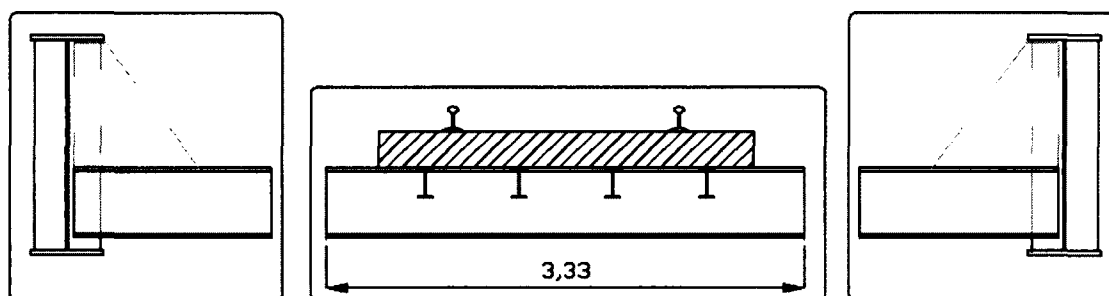


Figure 4.23: Pont à poutres latérales - Division de la structure

### Connexions

Pour contrôler le déversement latéral, la semelle supérieure des poutres longitudinales est connectée aux poutres transversales à l'aide de plaques d'acier (raidisseurs). De plus, pour ce type de ponts, des boulons de 25,4mm (1po) sont utilisés pour toutes les connexions à l'exception de celles des poutres transversales qui, elles, seront fixées avec des boulons de 38,1mm (1½po) de diamètre. Les tableaux 4.9 et 4.10 présentent respectivement les dimensions des plaques de connexion et la capacité de ces dernières. Les connexions Z, Y, X et W sont illustrées sur les plans de l'étude préliminaire apparaissant à l'annexe C.

**Tableau 4.9: Pont à poutres latérales - Plaques et boulons assurant la connexion**

Connexion	Longueur m	Plaque des semelles	Plaque d'âme	Nombre de boulons	Section	Quantité
Z	0,81	2PL240X14	-	60	A, B, C, D et E	18
	1,12	-	2PL1120X14	56		
Y	0,71	2PL120X16 280X16	-	12	Système transversal	56
	0,7	-	2PL235X14	12		
X	-	-	-	18	Plaque triangulaire	44
	-	-	-	7	Cornières	
	-	-	-	14		
	-	-	-	8	Poutre transversale	
	-	-	-	18	Plaque triangulaire	
W	-	-	-	7	Cornières	12
	-	-	-	14		
	-	-	-	8	Poutre transversale	

Tableau 4.10: Pont à poutres latérales - Capacité des connexions\*

Connexion	Longueur m	Plaque	Capacité des boulons kN	Capacité des plaques Effort tranchant kN	Moment fléchissant kN.m
Z	0,81	2PL240X14 510X14	3560	-	3870
	1,12	2PL1120X14	3320	3840	-
Y	0,71	2PL120X16 280X16	1600	-	2430
	0,7	2PL235X14	1600	800	-
X	-	-	1060	-	-
	-	-	410	-	-
	-	-	830	-	-
	-	-	470	-	-
W	-	-	1060	-	-
	-	-	410	-	-
	-	-	830	-	-
	-	-	470	-	-

\*Un exemple de calcul est présenté en annexe A.3

### Agencement

La hauteur d'appui étant constante, les possibilités d'agencement sont moins nombreuses que dans le cas du pont bi-poutres. Le tableau 4.11 présente l'agencement des sections requises pour des portées variant de 6 à 28m. Une vue en élévation d'un pont à poutres latérales d'une portée de 23m est illustrée à la figure 4.24. Les agencements associés aux autres portées sont montrés sur les plans de l'annexe C.

Tableau 4.11: Pont à poutres latérales - Agencement en fonction de la portée

Portée	Section	Portée	Section
5	-	17	2A&C&2D
6	2A&B	18	2A&2B&E
7	2A&C	19	2A&B&C&E
8	2A&2B	20	2A&2C&E
9	2A&D	21	2A&B&D&E
10	2A&2C	22	2A&C&D&E
11	2A&B&D	23	2A&2B&D&E
12	2A&C&D	24	2A&2D&E
13	2A&2B&D	25	2A&2C&D&E
14	2A&2D	26	2A&B&2D&E
15	2A&2C&D	27	2A&B&2C&D&E
16	2A&B&2D	28	2A&2B&2D&E

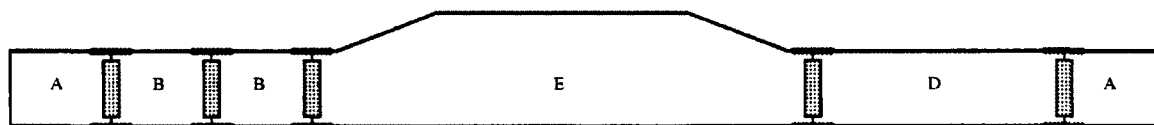


Figure 4.24: Pont à poutres latérales - Agencement pour une portée de 23m

### Quantités

Les tableaux 4.12 et 4.13 présentent les quantités de matériau nécessaires pour la construction de tout assemblage établi pour cette alternative. Ils tiennent compte du nombre minimal de sections à entreposer pour permettre à l'entreprise de réagir en cas d'urgence.

Tableau 4.12: Pont à poutres latérales - Quantités

Élément	Nombre	Matériau	Quantité tonne
Rails	2	Acier	0,27
Traverses	70	Bois	6,56
Poutres principales (pp)	2	Acier	36,77
Poutres transversales (pt)	28	Acier	6,57
Longerons	4	Acier	2,11
Raidisseurs	64	Acier	27,37
Plaques de connexion (pp)	12	Acier	5,65
Plaques de connexion (pt)	2	Acier	7,22
Boulons (pp)	3168	Acier	-
Boulons (pt)	2016	Acier	-

Tableau 4.13: Pont à poutres latérales - Quantités de matériaux

Matériau	Quantité tonne
Acier	95
Bois	7
Boulons	5184

### 4.2.3 Pont à treillis latéraux

Cette alternative a été entièrement retravaillée lors de l'étude préliminaire. Contrairement à l'étude de concept (figure 3.22), un seul niveau de treillis est retenu puisque ceci facilite la réalisation des connexions à effectuer sur le site. Les calculs détaillés ont montré que les connexions permettant l'empilement de treillis étaient très complexes et rendaient la solution analysée, à l'étude de concept, pratiquement impossible. L'abolition de niveaux de treillis

permet également d'omettre les câbles et ainsi éliminer la longueur des poutres servant à fixer les câbles (figure 3.22). La longueur des poutres transversales se limite donc à l'espacement entre les poutres longitudinales. Afin de permettre l'ajustement en longueur de la superstructure, une section d'extrémité semblable à celle du pont à poutres latérales est utilisée. Puisqu'elle est composée de plusieurs raidisseurs à l'appui, il est possible de la couper à la longueur désirée, une fois arrivé sur le site. La largeur totale des deux types de pont étant la même, la connexion de cette section d'extrémité aux treillis latéraux est donc possible.

Finalement, le type de système transversal élaboré pour le pont à poutres latérales est également utilisé pour le pont à treillis latéraux. Il est toutefois préférable de fixer ce système entre deux panneaux à treillis pour en faciliter la connexion. En plus de limiter le nombre de connexions, cette méthode de construction facilitera l'assemblage en diminuant le nombre de manipulations.

L'espacement maximal pouvant être non supporté a permis de déterminer la longueur de treillis à concevoir. Les dimensions des profilés d'acier ont ensuite été optimisées et leurs connexions définies pour assurer le transfert des efforts.

### Sections

Afin de faciliter l'assemblage, des panneaux à treillis de 3m de côté ont été créés à l'aide de cornières, de sections en « T » et de plaques d'assemblage. En raison de la longueur des connexions, une seule des possibilités analysées a été retenue pour ce type de tablier. Le tableau 4.14 énumère les dimensions des profilés d'acier utilisés pour chacune des sections de 3m illustrées à la figure 4.25. La capacité minimale requise est établie par le transfert de la tension (T) en effort tranchant (V) selon l'angle  $\alpha$  du profilé (équation 4.1).

$$V = T \cdot \sin \alpha \quad (4.1)$$

Il faut noter que plusieurs types de profilé auraient pu être retenus pour construire les treillis latéraux. L'emplacement géométrique et le type de profilés ont été choisis afin de limiter l'excentricité et simplifier les connexions. La longueur des connexions reliant le treillis à la section d'extrémité a, quant à elle, confirmé le choix retenu.

Tableau 4.14: Pont à treillis latéraux - Dimensions des profilés du treillis de 3m

		Quantité	Longueur m	Capacité kN	Portée max m
Horizontale	WT460X182.5	2	3	2842	28
Verticale	L203X203X16	4	2,81	1519	>28
Diagonale	L203X203X22	8	1,86	2087	28

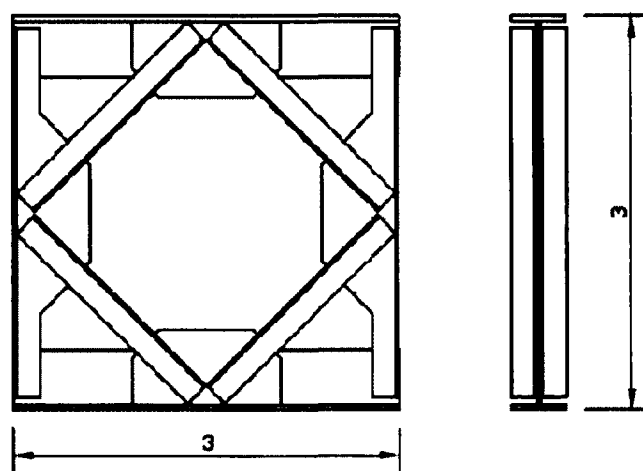


Figure 4.25: Pont à treillis latéraux - Élévation du treillis

### Ajustement en longueur

Pour permettre l'ajustement en longueur du pont à treillis latéraux, le même type de sections d'extrémité que celui retenu pour le pont à poutres latérales est utilisé. Ces sections seront fixées aux panneaux à treillis. Le treillis ayant une profondeur de 3m, les poutres longitudinales des sections d'extrémité doivent également être de 3m pour assurer une connexion adéquate. Les raidisseurs inclinés servant de support latéral pour ces sections devront avoir une capacité supérieure en raison de cette augmentation de hauteur. Tel que défini précédemment, les sections d'extrémité pourront être coupées à la longueur souhaitée, et ce, directement sur le site. Le tableau 4.15 présente quelques caractéristiques des plaques utilisées pour ces sections. La vue en élévation et la section transversale sont illustrées à la figure 4.26.

Tableau 4.15: Pont à treillis latéraux - Plaques de la section d'extrémité

Longueur m	Plaque des semelles mm	Plaque d'âme mm	Capacité*		Longueur de portée max m	Nombre de sections
			Effort tranchant kN	Moment fléchissant kN.m		
1,5	510X14	2550X22	6870	6970	25	1,5
0,75	510X14	VariableX22	6870 à 8000	6970 à 8200	25 à 27	0,75
0,75	510X14	2972X22	8000	8200	27	0,75

\*Des exemples de calcul sont présentés aux annexes A.2.2 et A.2.3

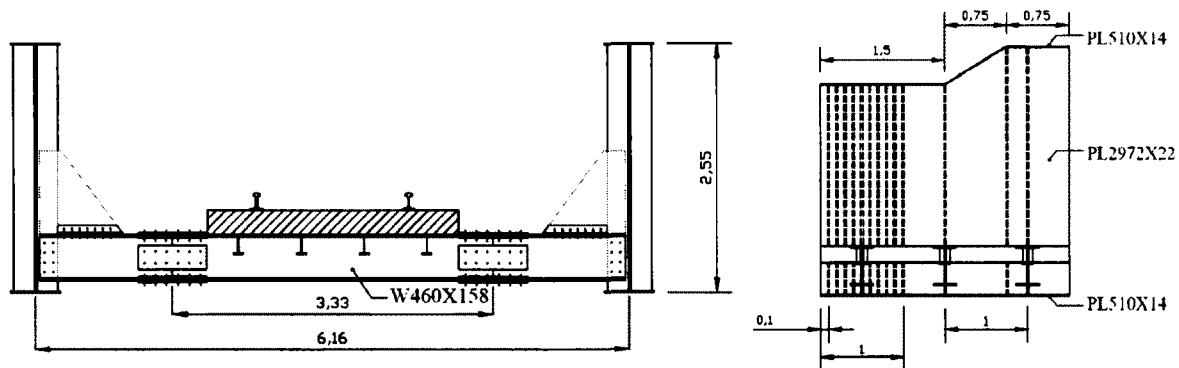


Figure 4.26: Pont à treillis latéraux - Élévation et section transversale de la section d'extrémité ajustable

### Système transversal

Les panneaux à treillis sont connectés les uns à la suite des autres en insérant un système transversal entre celles-ci. Puisque la longueur non supportée des longerons est supérieure à celle de l'alternative précédente, ceux-ci ont été adaptés. Pour les mêmes raisons, les poutres transversales ont également une aire de section plus importante. Le système transversal ainsi modifié est illustré à la figure 4.27.

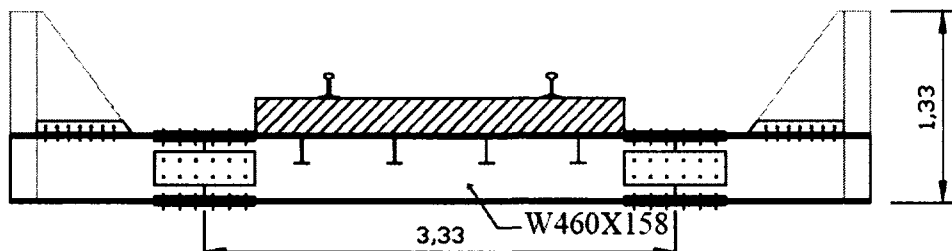


Figure 4.27: Pont à treillis latéraux - Système transversal

### Connexions

Les diamètres des boulons utilisés sont les mêmes que pour un pont à poutres latérales, soient de 38,1mm (1½po) pour les connexions des poutres transversales et de 25,4mm (1po) pour toutes les autres. Pour les sections d'extrémité et le système transversal, les dimensions des plaques de connexions et leur capacité sont identiques à celles du pont à poutres latérales. Les connexions des éléments de treillis sont, quant à elles, énumérées dans les tableaux 4.16 et 4.17. Elles sont représentées aux figures 4.28 à 4.30.

**Tableau 4.16: Pont à treillis latéraux - Plaques assurant la connexion du treillis**

Plaque mm	Longueur mm	Capacité kN	Quantité
160X20,3	542	1348	4
175,9X20	560	2156	4
160X20,3	640	1592	8
360,2X20	640	1568	4
-X15,9	-	3061	4
-X15,9	-	1948	2
-X20,3	-	2487	2
-X15,9	-	1948	2

**Tableau 4.17: Pont à treillis latéraux - Boulons assurant la connexion du treillis**

Connexion	Rangée	Nombre de boulons par rangée	Capacité kN	Quantité
A	2	11	2315	320
B	2	7	1273	
C	2	8	1448	
D	2	7	1564	



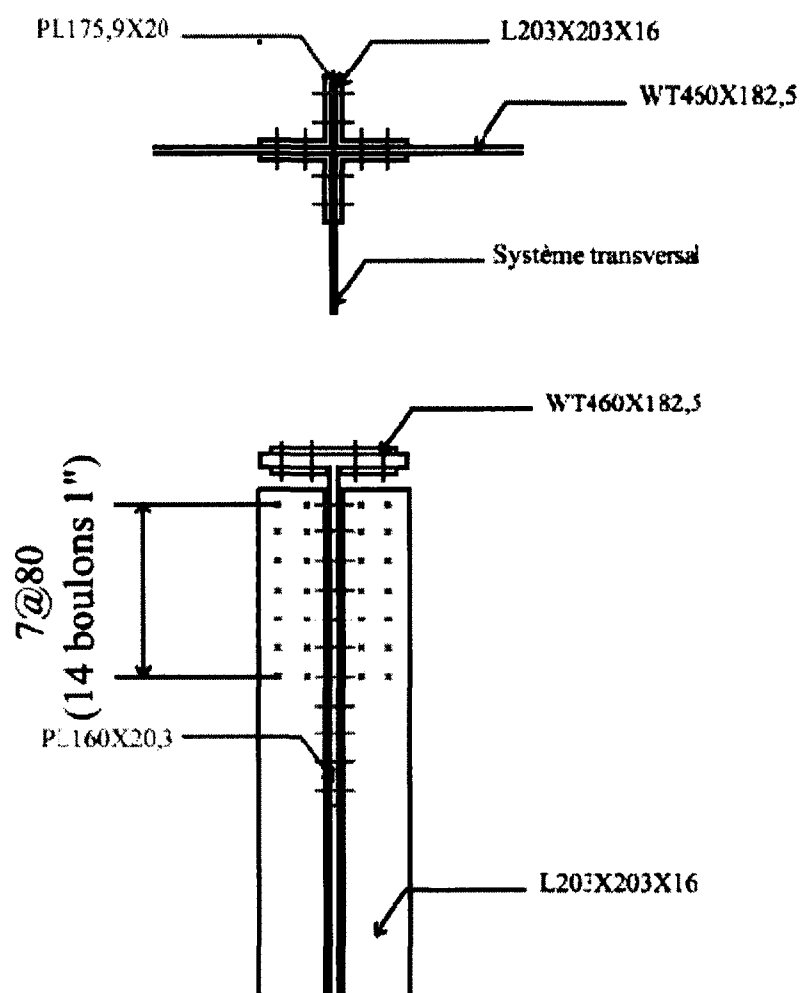


Figure 4.28: Pont à treillis latéraux - Connexion B

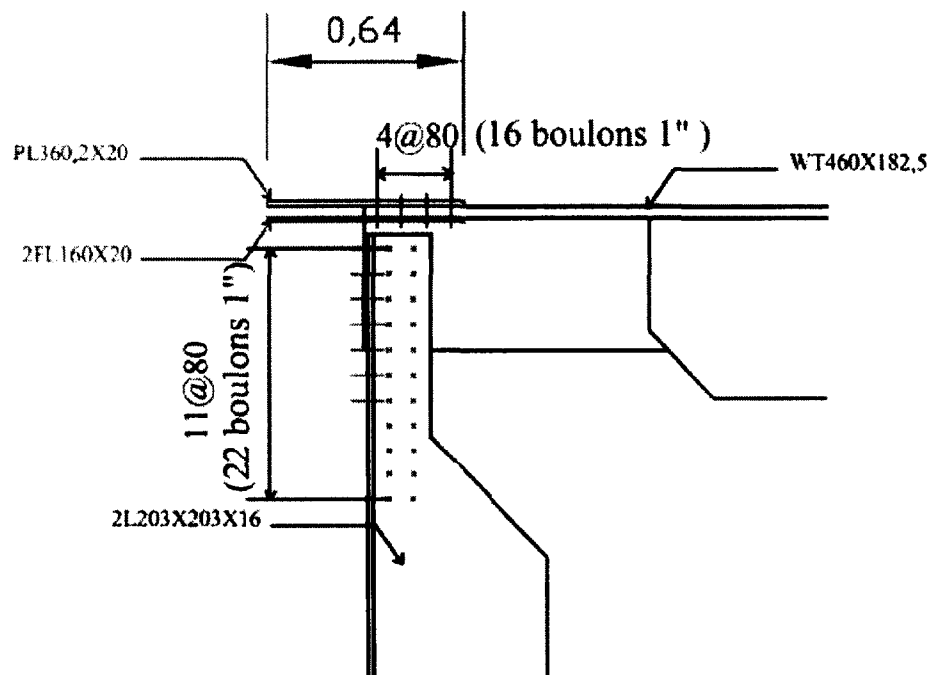


Figure 4.29: Pont à treillis latéraux - Connexion A et C

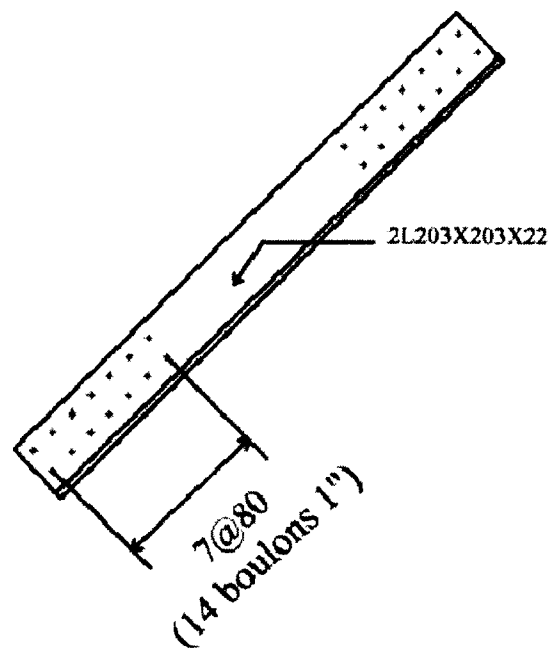


Figure 4.30: Pont à treillis latéraux - Connexion D

### Agencement

Ce type de pont a l'agencement le plus simple; il est constitué de deux types de sections différents. La longueur des sections d'extrémité est définie en conséquence du nombre de panneaux à treillis utilisés. Ce nombre est détaillé au tableau 4.18 et l'agencement des sections d'un pont de 20m est montré à la figure 4.31. Les agencements correspondant aux autres longueurs de portée sont représentés sur les plans de l'annexe C.

Tableau 4.18: Pont à treillis latéraux - Nombre de panneaux à treillis en fonction de la portée

Portée	Treillis	Portée	Treillis
5	0	17	4
6	0	18	4
7	1	19	5
8	1	20	5
9	1	21	5
10	2	22	6
11	2	23	6
12	2	24	6
13	3	25	7
14	3	26	7
15	3	27	7
16	4	28	8

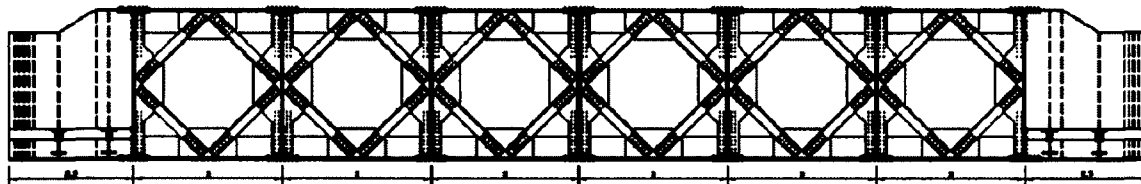


Figure 4.31: Pont à treillis latéraux - Agencement pour une portée de 23m

### Quantités

Les quantités d'acier requises pour une section transversale et une section d'extrémité sont indiquées respectivement dans les tableaux 4.19 et 4.20. De son côté, un panneau à treillis de 3m nécessite 2,91 tonnes d'acier. Comme pour les autres alternatives, les tableaux 4.21 et 4.22 présentent la quantité de matériau nécessaire pour la construction de tout assemblage potentiel.

**Tableau 4.19: Pont à treillis latéraux - Quantité d'acier de la section transversale**

Élément	Nombre	Quantité tonne
Poutres transversales (pt)	1	0,23
Longerons	4	6,33
Plaques de connexion (pt)	2	0,17
Boulons (pt)	94	-
Total		6,74

**Tableau 4.20: Pont à treillis latéraux - Quantité d'acier de la section d'extrémité**

Élément	Nombre	Quantité tonne
Poutres principales (pp)	2	2,82
Poutres transversales (pt)	3	0,70
Longerons	4	6,33
Raidisseurs	13	5,82
Plaques de connexion (pt)	6	0,52
Boulons (pt)	282	-
Total		16,19

**Tableau 4.21: Pont à treillis latéraux - Quantités**

Élément	Matériau	Nombre	Quantité tonne
Rails	Acier	2	0,27
Traverses	Bois	70	6,56
Treillis	Acier	18	52,45
Sections d'extrémité	Acier	2	32,37
Sections transversales	Acier	9	60,62
Boulons	Acier	12030	-

**Tableau 4.22: Pont à treillis latéraux - Quantités de matériaux**

Matériau	Quantité tonne
Acier	145,71
Bois	6,56
Boulons	12030



## CHAPITRE 5 ANALYSE MULTICRITÈRES

Afin de comparer les possibilités et de faire ressortir la meilleure solution en vue de réaliser les plans et devis d'un projet futur, une analyse multicritères a été réalisée. Ces critères sont définis à la section 5.1. La comparaison des alternatives en fonction de ces critères est présentée à la section 5.2.

### 5.1 Critères

#### 5.1.1 Gabarit sous le pont

Pour s'assurer que le transport routier ou maritime soit possible, le gabarit sous le pont projeté doit être considéré. La figure 5.1 ainsi que le tableau 5.1 illustrent la distance nécessaire pour l'installation des poutres principales proposées pour chacune des trois solutions retenues. Le gabarit sous l'ouvrage de la solution du pont à poutres latérales est la même que celle du pont à treillis latéraux.

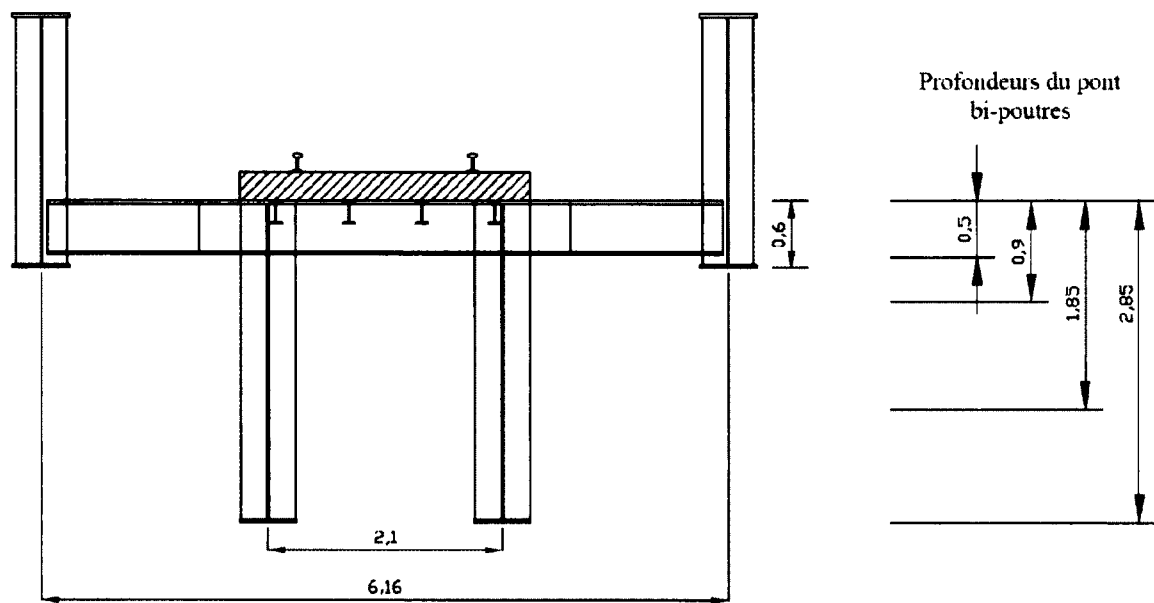


Figure 5.1: Dégagement requis pour l'installation des éléments du pont

Tableau 5.1: Profondeur maximale nécessaire sous la traverse de bois

Type de tablier	Profondeur
	mm
Bi-poutres	2,85
À poutres latérales	0,6
À treillis latéraux	0,6

### 5.1.2 Transportabilité et entreposage

#### Dimensions et poids

Les dimensions des sections préfabriquées doivent être inférieures à celles transportables par un camion semi-remorque standard : 2,5m de largeur, 15,5m de longueur et 3m de hauteur. La plus grosse section de chacune des solutions est énumérée au tableau 5.2 et représentée à la figure 5.2. De plus, la charge correspondant à chacune des sections est inférieure à 32 tonnes. Ces sections seront toutes transportables pour une période normale de transport (tableau 2.9).

Tableau 5.2: Dimensions et poids des plus grosses sections

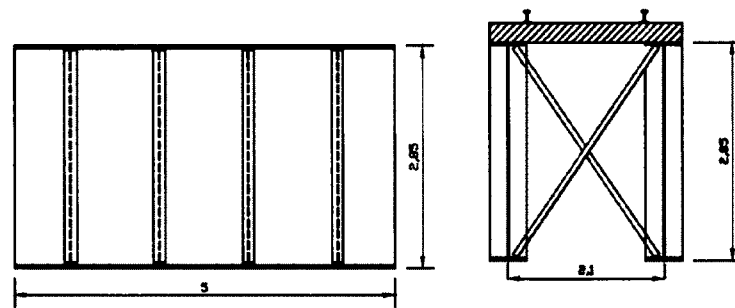
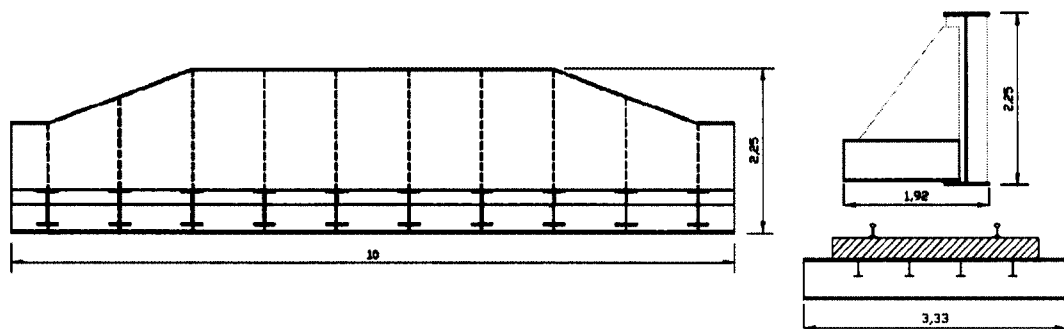
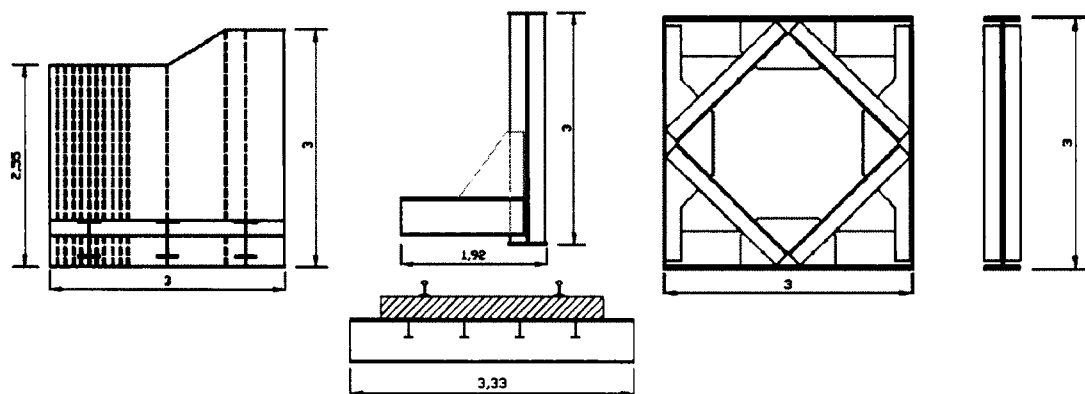
Type de pont	Largeur max m	Longueur max m	Hauteur max m	Poids tonne
Bi-poutres	2,61	10	2,85	3,61
À poutres latérales	1,92	5	2,25	5,21
À treillis latéraux	1,92	3	3	2,63

#### Quantité d'acier

La quantité d'acier nécessaire à la construction de l'ensemble des sections de chacune des solutions apparaît au tableau 5.3. Ces valeurs permettent d'obtenir une bonne approximation du coût engendré par les matériaux de construction. La figure 5.3 illustre la distribution du poids en fonction de la longueur de travée du pont à remplacer.

Tableau 5.3: Quantité totale d'acier

Type de pont	Quantité tonne
Bi-poutres	184
À poutres latérales	80
À treillis latéraux	75

**Pont poutres (section F-3)****Pont à poutres latérales (section E)****Pont à treillis latéraux****Figure 5.2: Dimensions des plus grosses sections**



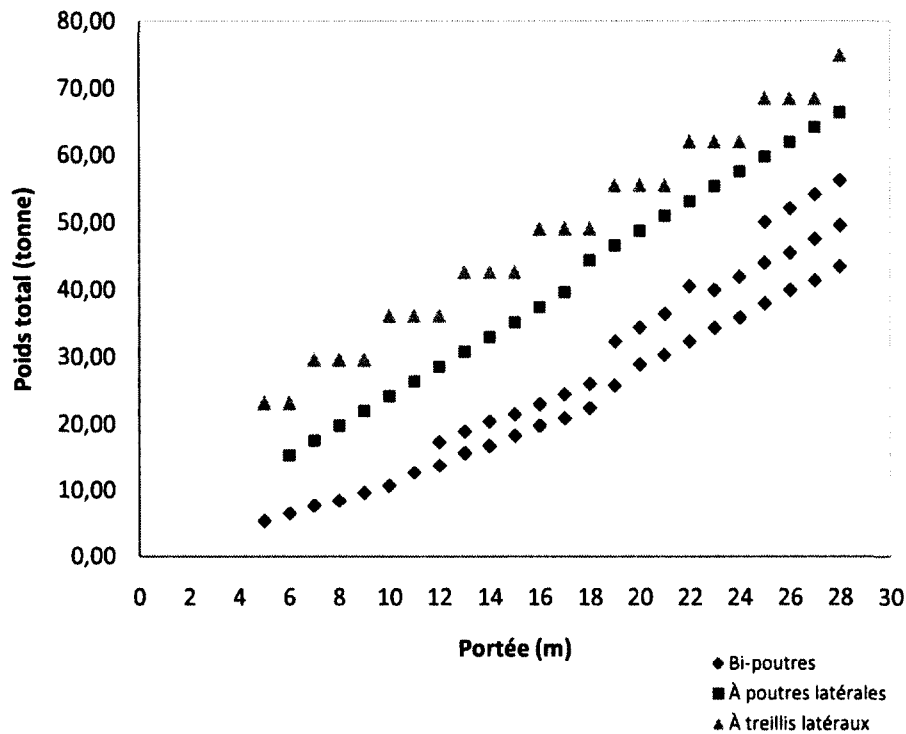


Figure 5.3: Poids total de la structure en fonction de sa portée

### 5.1.3 Constructibilité

#### Largeur

Puisque la structure sera utilisée avec les piliers et culées existants, la largeur du pont doit être considérée. Bien que de légères modifications puissent leur être apportées, il sera plus facile de mettre en place un tablier de même largeur ou plus étroit que celui endommagé. La figure 5.4 présente les différentes possibilités de construction.

En comparant le pont bi-poutres à celui à poutres latérales (même largeur que celui à treillis latéraux), il est possible de conclure que la solution bi-poutres est la plus viable en raison des conditions de mise en place. Dans certains cas, il sera nécessaire d'utiliser des cales de bois afin d'adapter la hauteur des appuis existants. Par contre, cet ajout semble mineur en comparaison avec la modification des murs en retour des culées nécessaire pour un tablier à poutres latérales. Pour permettre la mise en place de ce dernier, les murs en retour des culées existantes devront être enlevés, puis une poutre transversale et un profilé en acier devront y être ajoutés.

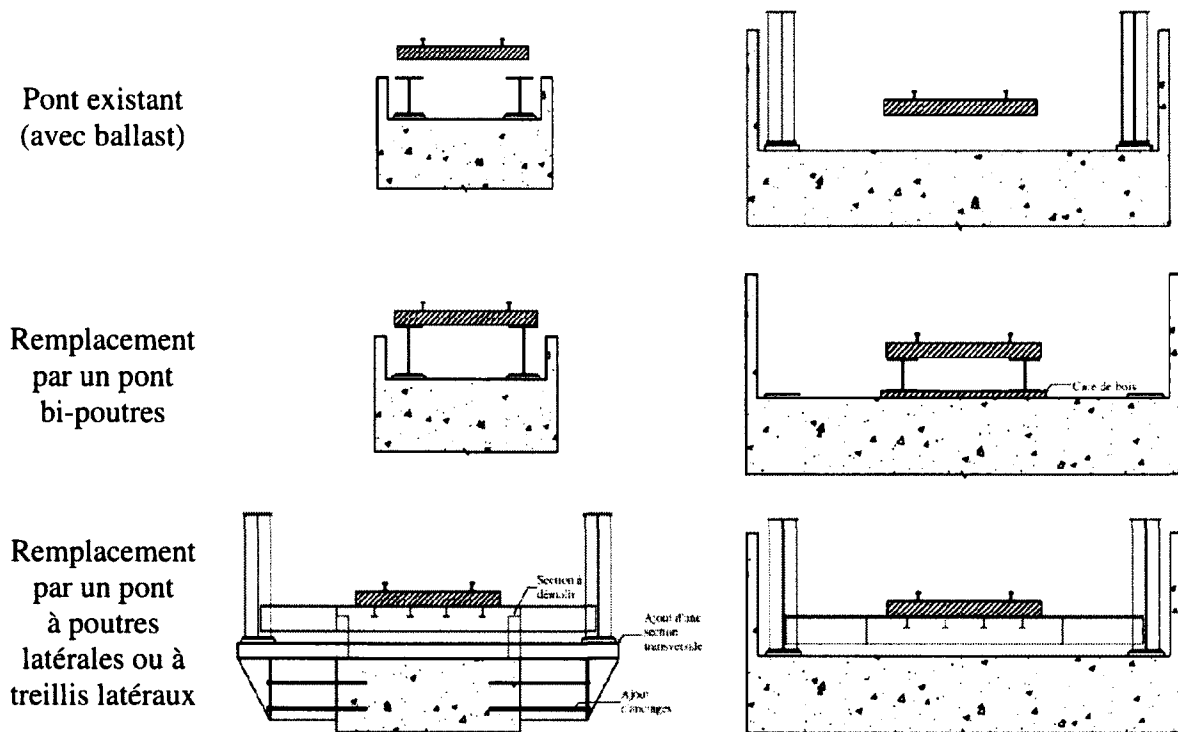


Figure 5.4: Largeur du pont

### Sections

Toutes les sections nécessaires à la construction de pont ayant une portée de 5 à 28m seront entreposées. Pour pouvoir comparer l'espace nécessaire à l'entreposage, le temps de construction et la simplicité d'exécution, le tableau 5.4 compare le nombre de sections différentes de chacune des solutions. La figure 5.5 illustre le nombre total de sections requis pour la construire de chacune des portées.

Tableau 5.4: Nombre de sections différentes

Type de pont	Nombre de Sections
Bi-poutres	17
À poutres latérales	5
À treillis latéraux	2

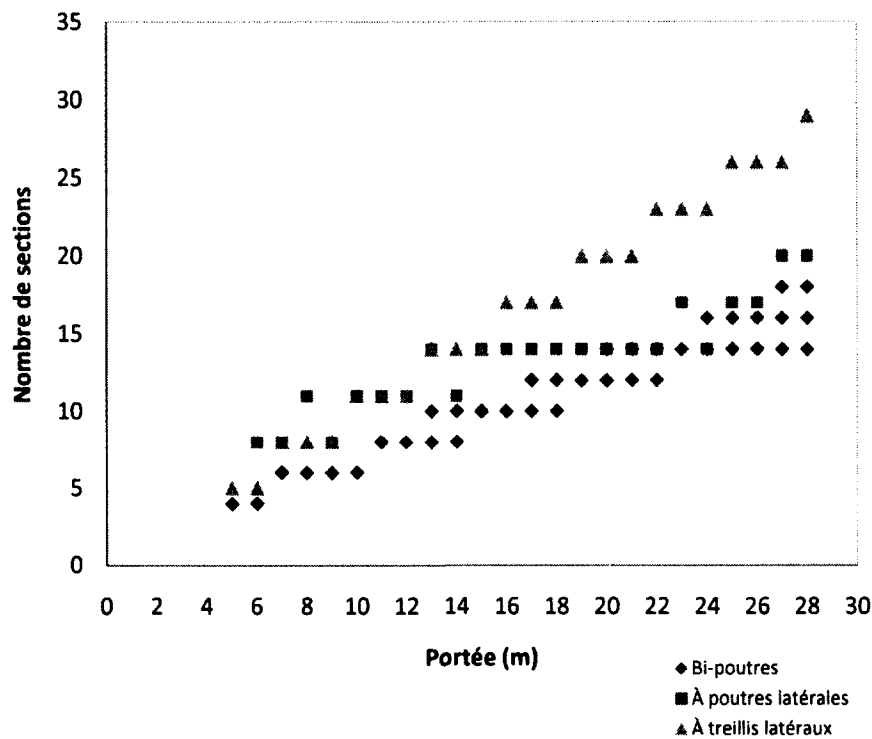


Figure 5.5: Nombre de sections en fonction de la portée

### Connexions

Le nombre de connexions détermine la durée de l'assemblage des sections (poutres maîtresses et système transversal). Le tableau 5.5 présente le nombre total de connexions pour chacune des solutions ainsi que le nombre à réaliser sur le site.

Tableau 5.5: Nombre de connexions (cas le plus critique)

Type de pont	Nombre de connexions sur le site	Nombre de connexions différentes
Bi-poutres	48	11
À poutres latérales	168	9
À treillis latéraux	39	6

### Temps de boulonnage

Le temps associé à l'érection du tablier temporaire doit également être évalué puisque ce concept doit réduire au minimum le temps d'interruption du trafic. Afin de diminuer ce délai, il va de soi que plusieurs équipes d'ouvriers devront travailler en même temps sur la structure.

Par contre, aux fins de comparaison, le tableau 5.6 présente un estimé du temps de boulonnage sur le site, en considérant qu'un seul ouvrier met en place 40 boulons en une heure. La figure 5.6 illustre la répartition des délais de boulonnage en fonction de la longueur de portée de chacune des solutions retenues.

Tableau 5.6: Temps de boulonnage (cas le plus critique)

Type de tablier	Nombre de boulons	Temps de boulonnage h
Bi-poutres	1498	37h27
À poutres latérales	1488	37h12
À treillis latéraux	2232	55h48

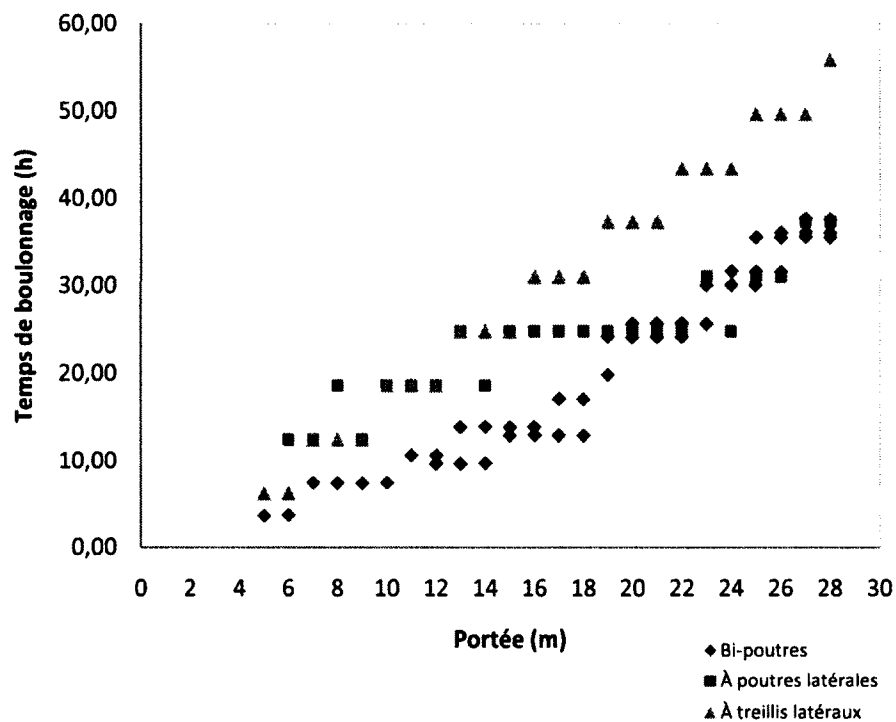


Figure 5.6: Temps de boulonnage en fonction de la portée

## 5.2 Comparaison

La comparaison des trois solutions permet de faire ressortir l'alternative ayant le moins d'impact sur le trafic, le délai de mise en place le plus restreint et une quantité de matériaux limitée. Puisque les trois solutions retenues à l'étape de l'étude préliminaire sont adéquates, le tableau 5.7 a pour but d'évaluer les caractéristiques de chacune d'elles en fonction des critères énumérés aux pages précédentes. Afin de faciliter l'évaluation des alternatives, la cote « 1 » est accordée à la pire solution alors que « 5 » représente la meilleure. À la fin de cette comparaison, la valeur totale la plus élevée indiquera la solution la plus appropriée pour ce projet.

**Tableau 5.7: Comparaison des trois solutions retenues**

Critères	Type de pont		
	Bi-poutres	À poutres latérales	À treillis latéraux
<b>1 Gabarit sous le pont</b>	1	5	5
<b>2 Transportabilité et entreposage</b>			
A Dimensions	5	3	3
B Quantité d'acier	3	5	5
<b>3 Constructabilité</b>			
A Largeur	5	1	1
B Sections	1	3	5
C Connexions	3	3	5
D Temps de boulonnage	5	5	3
<b>Total</b>	23	25	27

Ainsi, il est possible de constater que les solutions de tabliers ouverts sont préférables lorsque le gabarit requis sous la structure est considéré. Le pont bi-poutres est un choix justifié lorsque la dimension des sections est favorisée. Pour la quantité d'acier, les tabliers ouverts sont favorisés puisqu'ils requièrent moins de matériaux en raison de leur nombre réduit de sections différentes. Les coûts engendrés par les matériaux étant inférieurs, les ponts à poutres latérales ou à treillis latéraux sont donc plus avantageux.

Puisque le projet consiste à élaborer un concept de pont ferroviaire mobile mis en place et en service en moins de 24 heures, la constructibilité est un critère déterminant. Bien que la largeur du tablier soit importante pour la réutilisation des culées existantes, le temps de boulonnage doit également être considéré. La figure 5.4 illustre bien que le pont bi-poutres peut être utilisé sur tout type de site. Par contre, son temps de boulonnage est supérieur à celui du pont à treillis latéraux. Dans le cas des solutions à tablier ouvert, le nombre de sections différentes est inférieur à celui du pont bi-poutres. Il est donc possible d'affirmer que les manipulations seront simplifiées lors de l'assemblage de ces superstructures temporaires. Il en est de même quant à la quantité de connexions différentes pour les ponts bi-poutres ou à treillis latéraux.

Après avoir comparé l'ensemble des solutions, l'utilisation du pont à treillis latéraux semble la plus appropriée pour ce type de projet. Bien que celle-ci nécessite l'ajustement de certaines culées, les coûts engendrés par son entreposage, son transport et les matériaux requis pour toutes ses sections constituent un avantage pour le CN



## CHAPITRE 6 CONCLUSION

L'analyse des méthodes de construction existantes ainsi que celle des ponts piétonniers, routiers et militaires ont permis la réalisation de ce projet. En comparant le domaine routier au ferroviaire, il a été établi que les types de ponts existants ne sont pas adaptés au trafic ferroviaire de marchandises. En étudiant les caractéristiques de ceux-ci et les plans du CN, il a été possible d'identifier, dès le début du projet, des concepts de structure. Puis, en effectuant de nombreux calculs et en vérifiant l'assemblage géométrique, un concept de pont ferroviaire mobile pouvant être utilisé sur l'ensemble du territoire du CN a été élaboré. Ce concept unique aura des applications multiples en raison de son adaptabilité en hauteur et en longueur.

Des cinq types de ponts évalués, trois ont été analysés plus en détail à l'étape de l'étude préliminaire. Puis, grâce à l'analyse multicritères, le pont à treillis latéraux a été jugé le plus approprié pour répondre aux besoins du CN. Ce type de superstructure pourra être utilisé pour diverses portées et sur différents sites. Ce tablier pourra également s'adapter aux différentes profondeurs d'appui afin de réutiliser les piliers et culées déjà en place. De plus, ce pont mobile sera transporté, érigé puis mis en service en moins de 48 heures. La méthode d'érection à l'aide d'une grue et l'assemblage boulonné assureront la rapidité des travaux et la sécurité des ouvriers. Un lancement pourra aussi être possible lors de l'utilisation de ce concept.

Les délais d'érection étant diminués, l'impact économique relié à cette interruption de services sera réduit, lui aussi. L'interruption limitée du temps de transport des marchandises ou des passagers permettra d'assurer une meilleure santé économique, et ce, tant pour l'entreprise que pour le Canada (impact direct sur le PIB). En plus de réduire le mécontentement des utilisateurs, une entreprise comme le CN, aura un gain d'espace dans ses entrepôts. Puisque les sections calculées en phases préliminaires seront mis en place plus rapidement que les poutres « d'urgence » actuellement utilisées, une telle entreprise économisera également dans les coûts associés à la réfection de ses ouvrages.



## 6.1 Recommandations

L'élaboration du concept étant terminée, une seconde phase au projet permettrait d'effectuer une conception plus détaillée de tous les éléments de la superstructure. Par la suite, il pourrait être intéressant de tester un prototype en laboratoire afin de vérifier la résistance, la flexibilité et la stabilité des éléments calculés.

La fatigue de l'acier, causée par la vibration au passage d'un train, devra également être étudiée afin de déterminer le nombre d'utilisations maximales que pourra supporter la structure. Les modifications apportées au tablier ainsi que son plan d'entretien pourront également être élaborées et, par la suite, effectuées entre chacune des utilisations de ce pont temporaire.

## 6.2 Recherches futures

Puisque ce projet utilise les normes et codes en vigueur, il pourrait être intéressant d'adapter cette structure au fil du temps. La nécessité de remplacer des ouvrages détériorés ou inutilisables sera toujours une réalité à laquelle les ingénieurs en structure devront faire face.

Bien qu'un tablier puisse être mis en place rapidement, il demeure essentiel que les fondations sur lesquelles il repose soient adéquates pour reprendre toutes les charges. Une analyse détaillée de la conception de piliers temporaires serait donc un projet de recherche profitable pour l'industrie ferroviaire.

# ANNEXE A

## NOTES DE CALCUL

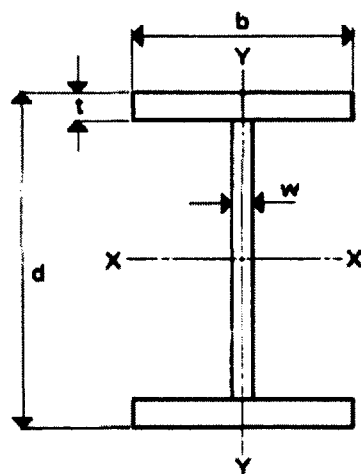
### A.1 Équations

Le dimensionnement d'un pont ferroviaire mobile doit respecter la norme *AREMA* et le guide de conception du CN. De nombreuses équations ont été utilisées pour réaliser le dimensionnement des différents types de pont de ce projet et celles-ci sont énumérées aux pages suivantes.

#### A.1.1 Poutres

##### Section

Pour un profilé en « I » bi-symétrique, les équations sont les suivantes:



$$A = 2bt + (d - 2t) w$$

$$I = \frac{1}{12} [bd^3 - (b - w)(d - 2t)^3]$$

$$S = \frac{1}{6d} [bd^3 - (b - w)(d - 2t)^3]$$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$Z = \frac{1}{4} [bd^2 - (b - w)(d - 2t)^2]$$

Figure A.1: Caractéristiques d'un profilé en « I »<sup>1</sup>

Épaisseur de l'âme :

$$w(\text{pouce}) \geq \frac{\sqrt{F_y}}{30\,500} h \quad (\text{A.1})^2$$

$$w \geq 0.013 \text{ m} \quad (\text{A.2})^3$$

Épaisseur des semelles :

$$w \geq \frac{3}{4}'' = 0.019 \text{ m} \quad (\text{A.3})^4$$

<sup>1</sup> [Handbook of Steel Construction, page 7-59]

<sup>2</sup> [AREMA, 2003, article 15-1.7.3]

<sup>3</sup> [CN, 2006b]

<sup>4</sup> [AREMA, 2003, article 15-1.7.2]

**Effort tranchant**

Âme :

$$V = 0.35F_y A \quad (A.4)^5$$

Semelles :

$$V = 0.55F_y A \quad (A.5)^6$$

**Moment fléchissant**

$$M = V \cdot h \quad (A.6)$$

**Flèche**

$$\Delta \leq \frac{L}{640} \quad (A.7)^7$$

L : Longueur de travée

**Vérifications****Élancement :**

Membrane en compression :

$$\frac{L}{r} \leq 100 \quad (A.8)^8$$

Membrane en tension :

$$\frac{L}{r} \leq 200 \quad (A.9)$$

r : Rayon de giration

**A.1.2 Raidisseurs****Intermédiaires**

Nécessaire si :

$$\frac{h}{w} > \frac{11\,400}{\sqrt{F_y}} \quad (A.10)^9$$

<sup>5</sup> [AREMA, 2003, article 15-1.4.1, tableau 15-1-11]<sup>6</sup> [AREMA, 2003, article 15-1.4.1, tableau 15-1-11]<sup>7</sup> [AREMA, 2003, article 15-1.2.5]<sup>8</sup> [AREMA, 2003, article 15-1.5.1]<sup>9</sup> [AREMA, 2003, article 15-1.7.8]

Distance entre les raidisseurs :

$$d \leq \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{10\,500w}{\sqrt{S}} \\ 96'' \\ h \end{array} \right. \quad (A.11)^{10}$$

d : Distance entre deux raidisseurs (pouce)

w : Épaisseur de l'âme (pouce)

S : Stress en cisaillement (psi)

### A.1.3 Connexions

Afin de limiter l'impact de la fatigue sur les connexions, le CN exige que les connexions soient boulonnées. Les excentricités sont donc à considérer.

#### Boulons

Cisaillement boulon A325 :

$$B_r = 17\,000A \quad (A.12)^{11}$$

$B_r$  : Capacité en cisaillement d'un boulon (lbs)

A : Surface d'un boulon (po<sup>2</sup>)

$$\text{nombre boulon} = \frac{v}{\text{plans en cisaillement} \cdot B_r} \quad (A.13)$$

$$\text{nombre boulon/rangée} = \frac{\text{nombre boulon}}{\text{nombre rangée}} \quad (A.14)$$

#### Plaques

Selon le code, la capacité minimale des plaques de connexion doit correspondre à la valeur maximale entre la capacité de la section de la poutre correspondante et celle nécessaire pour résister à l'effort à transmettre. Dans l'ensemble de ce projet, les dimensions des plaques correspondent à celles des sections de la poutre. Ainsi, les équations à utiliser sont les équations A.3 et A.4 où la variable « A » représente l'aire de la section de la plaque.

<sup>10</sup> [AREMA, 2003, article 15-1.7.8]

<sup>11</sup> [AREMA, 2003, article 1.4.1, tableau 15-1-11]

## A.2 Exemple de calcul de la capacité d'une poutre

### A.2.1 Données

Pour une poutre en « I » bi-symétrique ayant les dimensions suivantes :

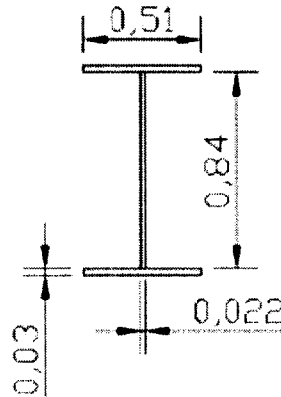


Figure A.2: Pont bi-poutres - Dimensions d'une poutre (section A)

$$F_y = 350 \text{ MPa}$$

### A.2.2 Effort tranchant

La capacité en cisaillement est principalement reprise par l'âme d'une poutre en « I ». À l'aide de l'équation A.4 et en négligeant la capacité des semelles, on obtient :

$$\begin{aligned} V_r &= 0,35 F_y A \\ V_r &= 0,35 \cdot 350 \cdot (840 \cdot 22) \\ V_r &= 2263,8 \text{ kN} \end{aligned}$$

La valeur obtenue est supérieure à celle nécessaire pour résister à l'effort tranchant d'une poutre de 24m et inférieure à celle d'une poutre de 25m.

### A.2.3 Moment fléchissant

La capacité en moment fléchissant est principalement reprise par les semelles d'une poutre en « I ». Dans le calcul, la capacité de l'âme est négligée. À l'aide des équations A.5 et A.6, on obtient :

$$\begin{aligned} M_r &= 0,55 F_y A h \\ M_r &= 0,55 \cdot 350 \cdot (510 \cdot 30) \cdot (840 + \frac{30}{2} \cdot 2) \\ M_r &= 2564,3675 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Pour les 2 semelles,

$$M_r = 2 \cdot 2564,3675 = 5124,735 \text{ kN.m}$$

La valeur obtenue est supérieure au moment maximal correspondant à une poutre de 21m et inférieure à celle d'une poutre de 22m.

#### A.2.4 Capacité

La poutre peut donc reprendre les charges d'un tablier ayant 21m de portée (la capacité la plus petite entre le cisaillement et le moment).

### A.3 Exemple de calcul de la capacité d'une connexion

La capacité d'une plaque de connexion se calcule exactement comme celle d'une poutre. Lors du calcul de la capacité de la connexion, il faut aussi tenir compte de la capacité des boulons.

#### A.3.1 Données

Cet exemple concerne la vérification de la capacité de la connexion de l'âme de la poutre suivante :

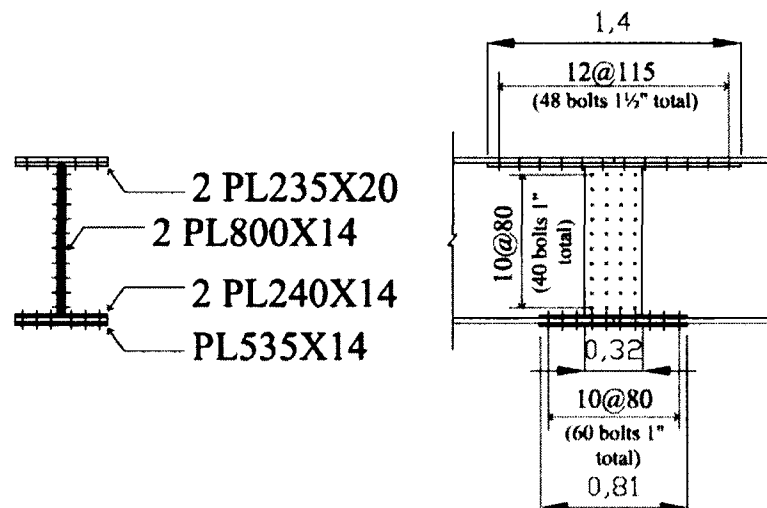


Figure A.3: Pont bi-poutres - Connexion Z

$$V_{\max} = 2263,8 \text{ kN}$$

#### A.3.2 Plaques de connexion

La capacité des plaques de connexion se calcule à l'aide des équations A.4, A.5 et A.6. Dans cet exemple, les plaques reprennent uniquement des efforts de cisaillement.

$$\begin{aligned} V_r &= 0,35 F_y A \\ V_r &= 0,35 \cdot 350 \cdot (800 \cdot 14) \\ V_r &= 1372 \text{ kN} \end{aligned}$$

Puisqu'il y a une plaque de chaque côté de l'âme,

$$V_r = 2 \cdot 1372 = 2744 \text{ kN} > V_{\max} = 2263,8 \text{ kN}$$

### A.3.3 Boulons

2 rangées de 10 boulons par côté = 20 boulons

Tout d'abord, il faut savoir la capacité d'un seul boulon.

Pour un boulon de 0,025m de diamètre (1"),

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,025^2}{4} = 0,00051 \text{ m}^2$$

En utilisant l'équation A.12 et en convertissant les unités,

$$\begin{aligned} V_r &= 17\,000A \\ V_r &= 17\,000 (6,894757A) \\ V_r &= 17\,000 (6,894757 \cdot 0,00051) \\ V_r &= 59,3916 \text{ kN} \end{aligned}$$

Puis, pour obtenir la capacité de 20 boulons,

$$B_r = 20 \cdot 2 \text{ plans} \cdot 59,3916 = 2375,66 \text{ kN}$$

Puisque l'excentricité est très petite, elle peut être négligée.

### A.3.4 Capacité

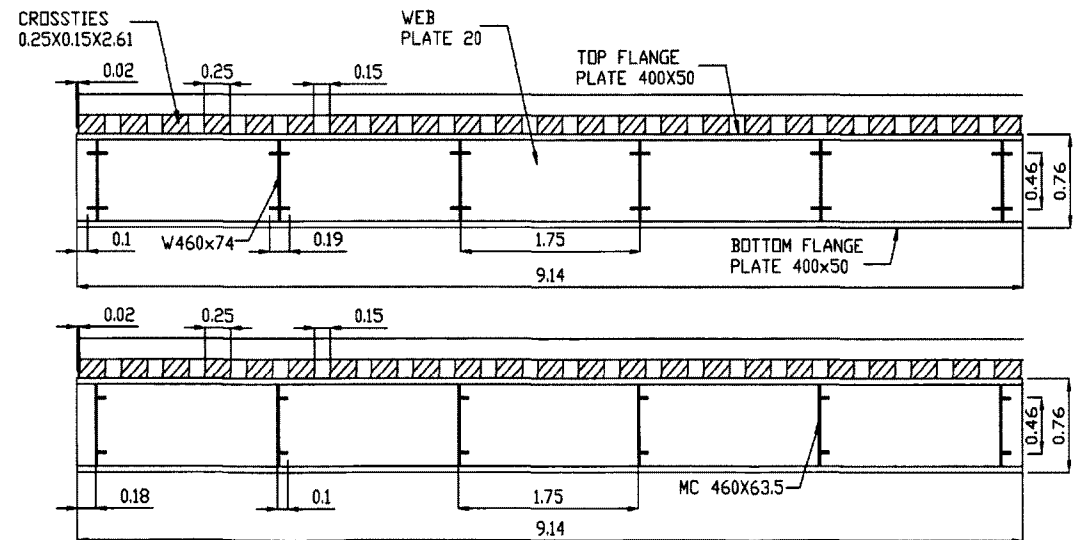
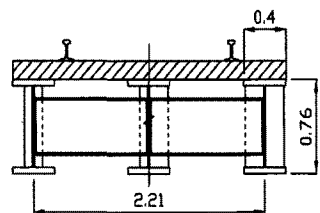
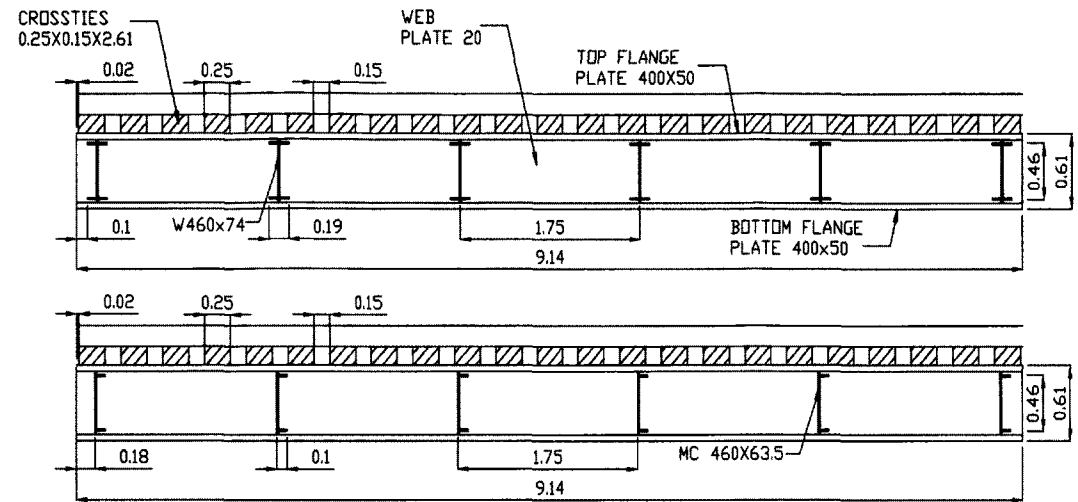
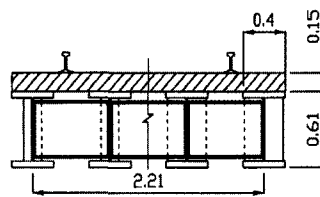
La capacité de la connexion de l'âme est donc d'environ 2370 kN.

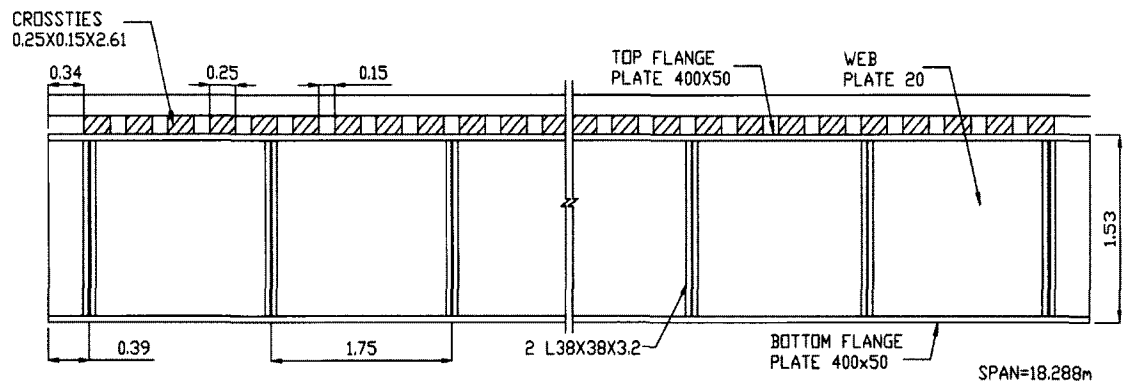
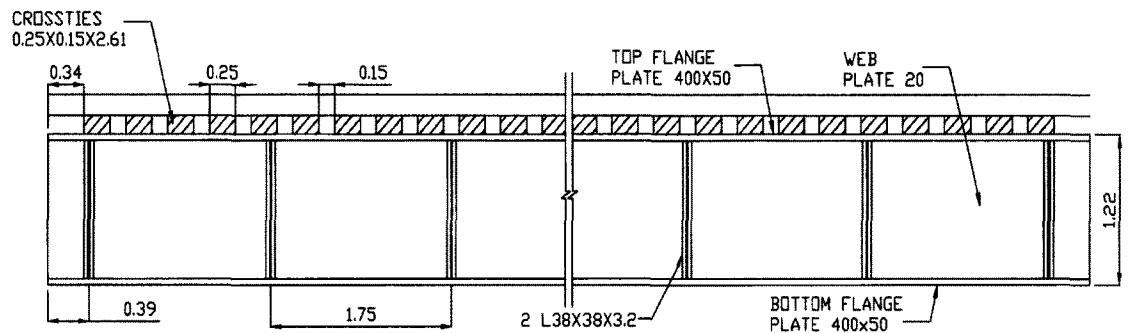
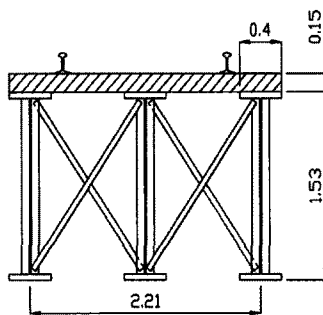
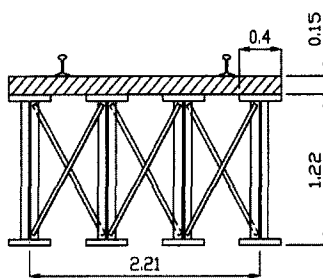
## ANNEXE B

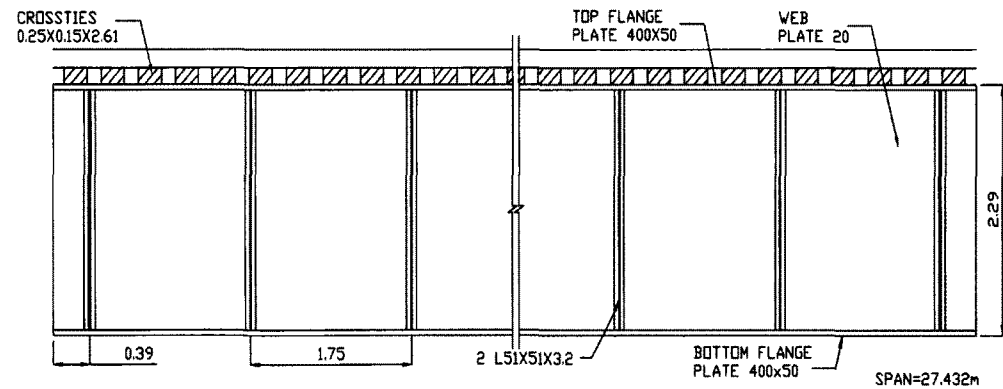
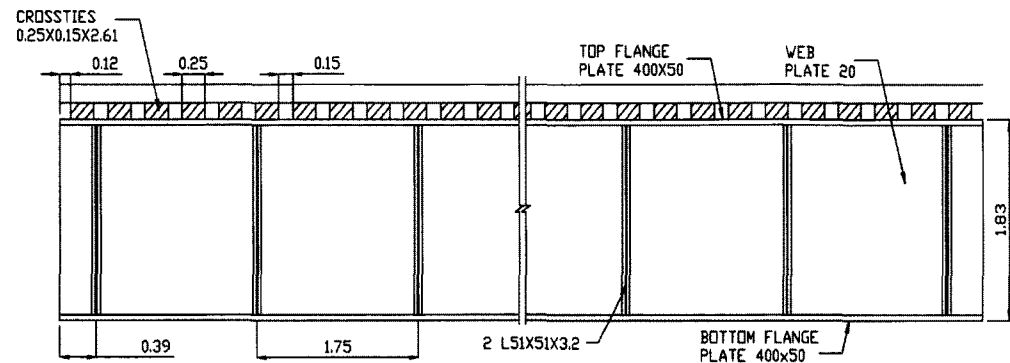
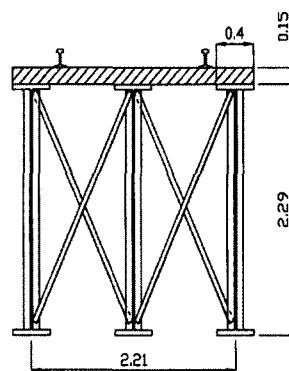
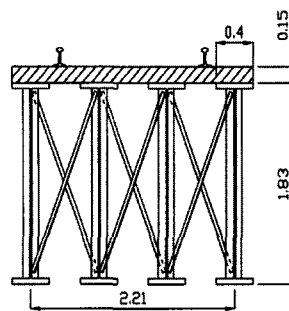
### PLANS – ÉTUDE DE CONCEPT

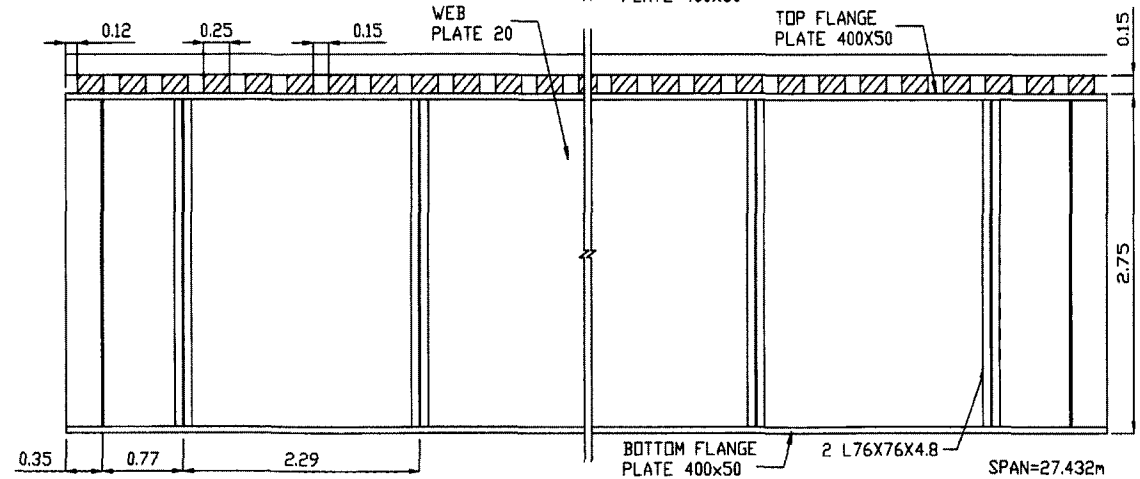
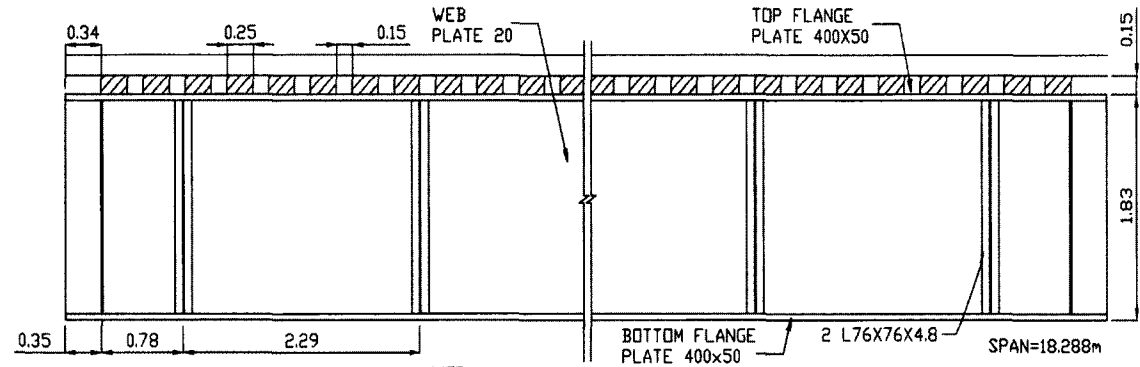
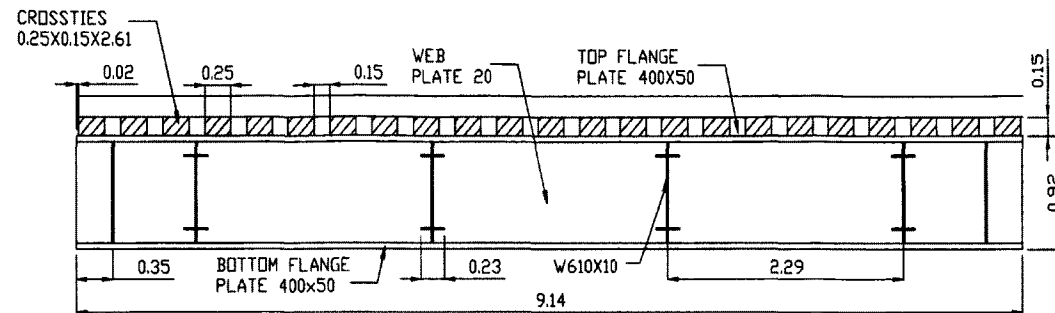
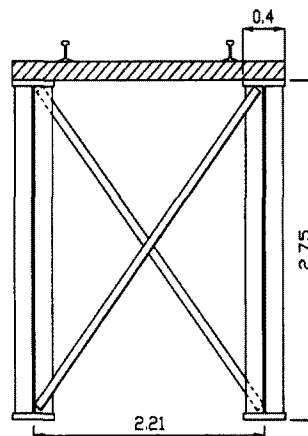
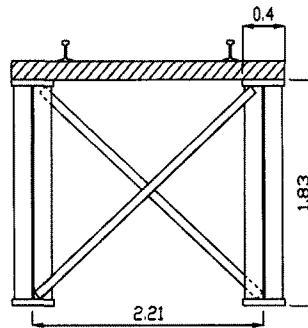
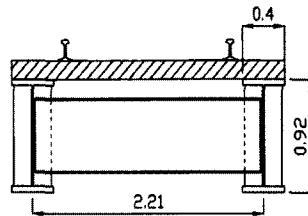


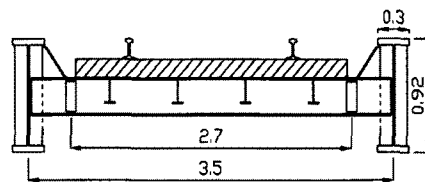




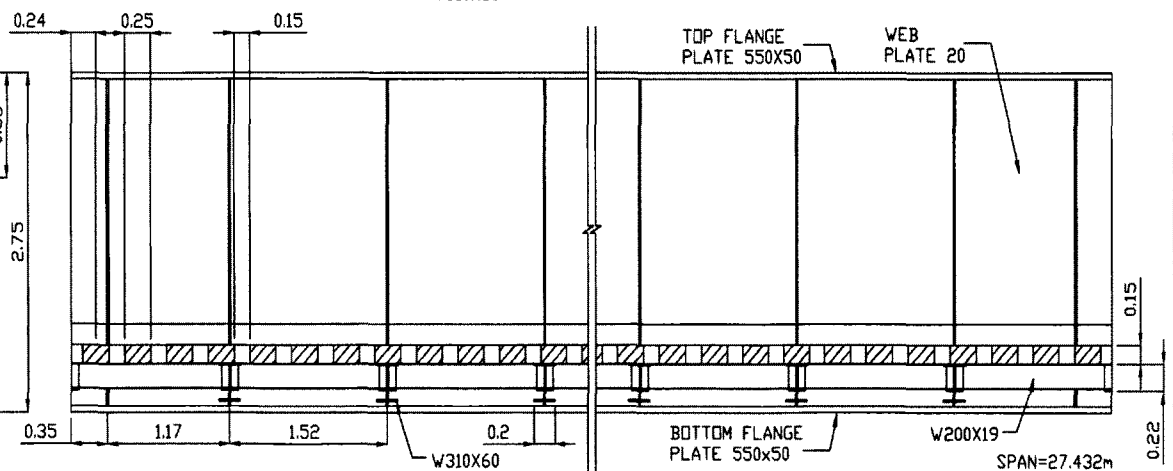
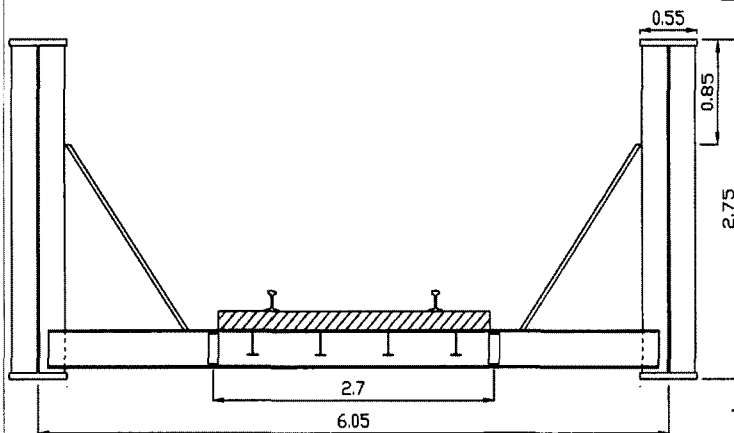
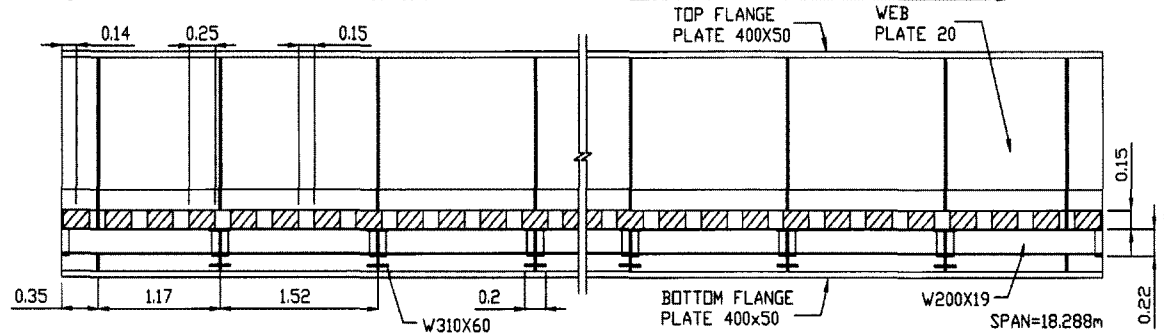
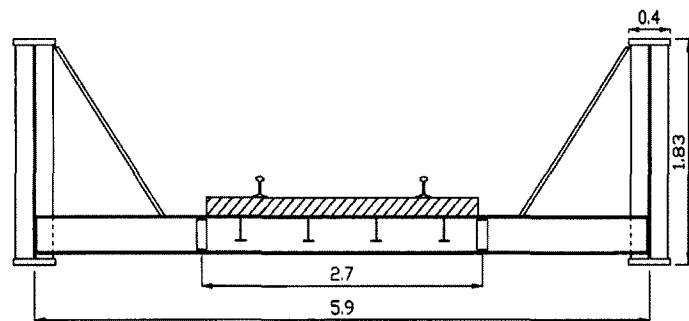
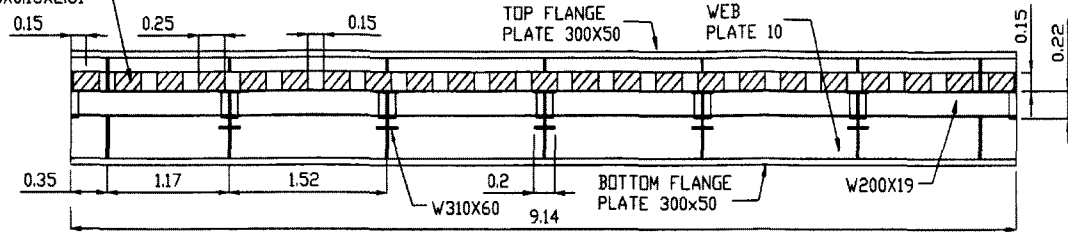


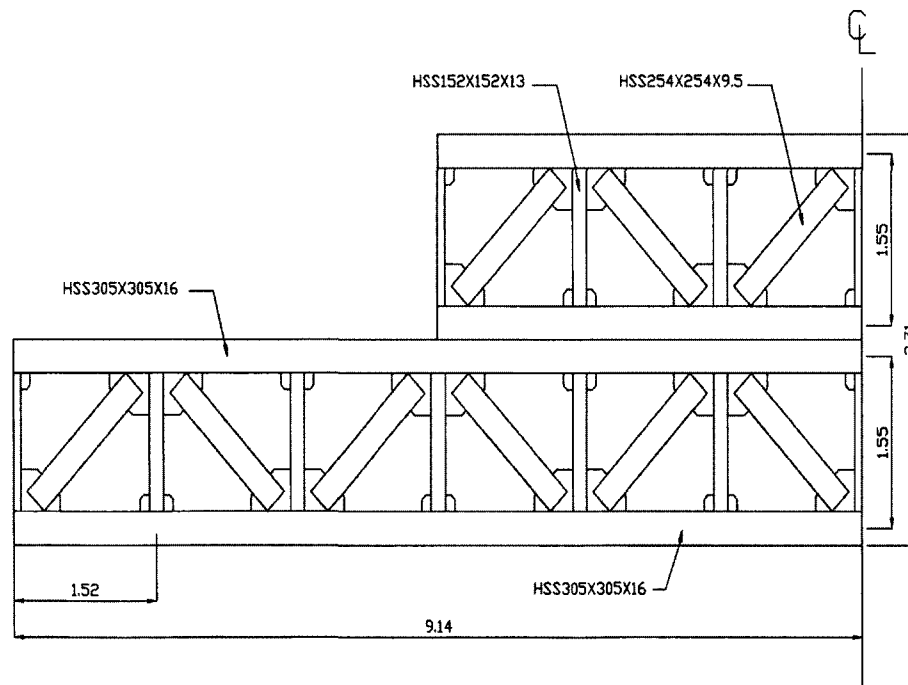
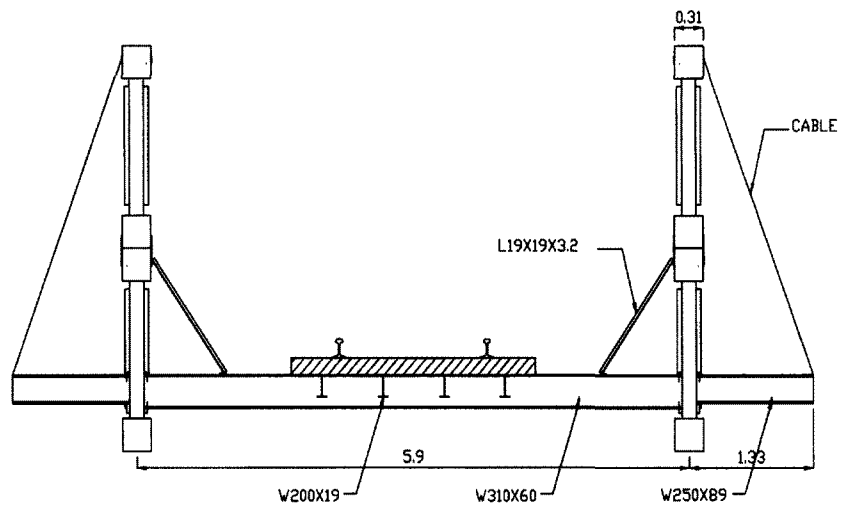
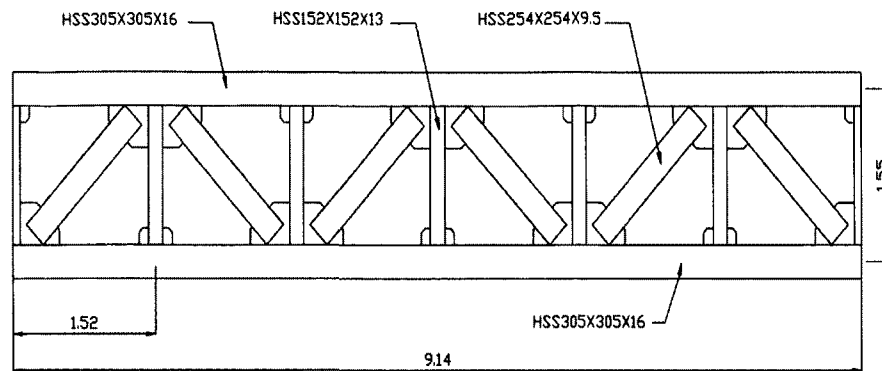
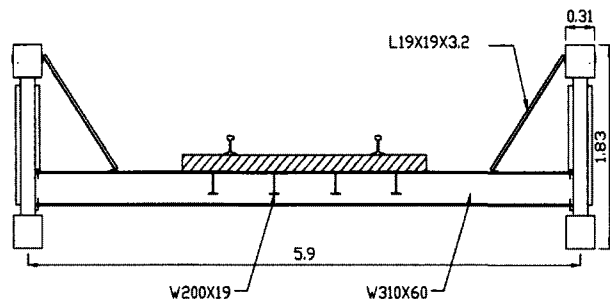


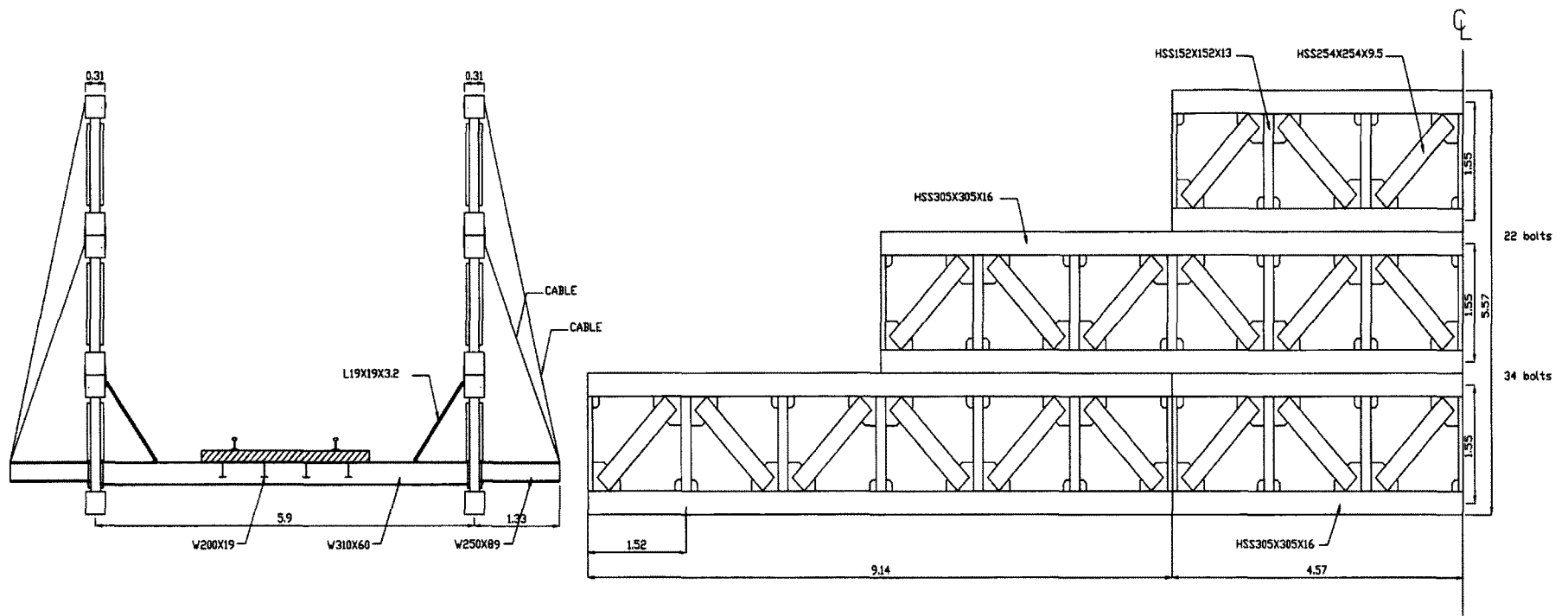




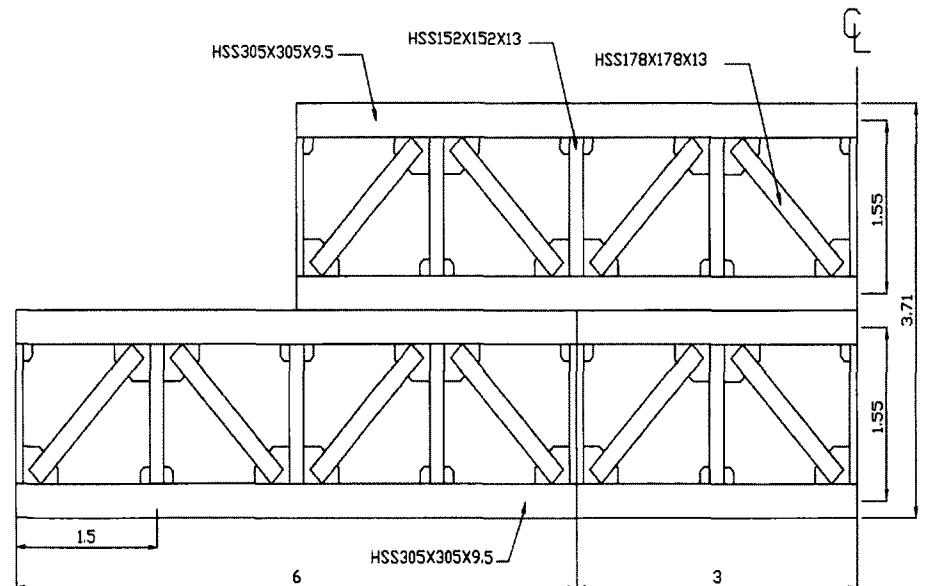
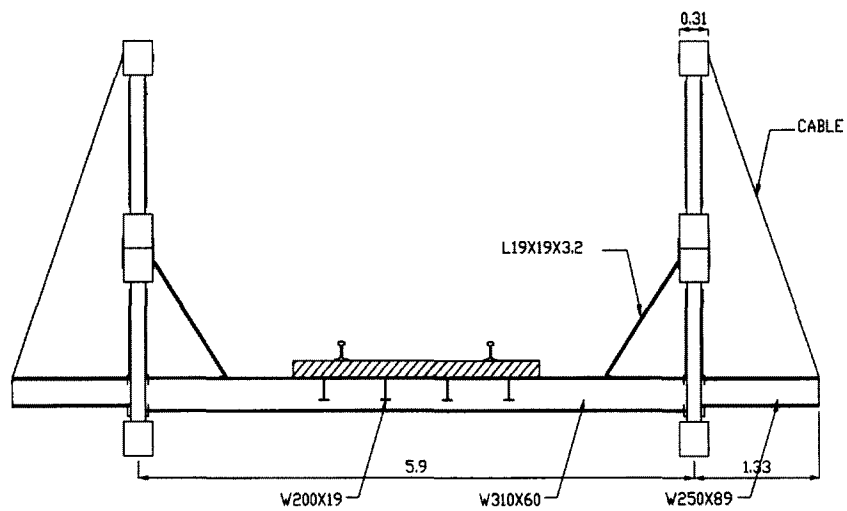
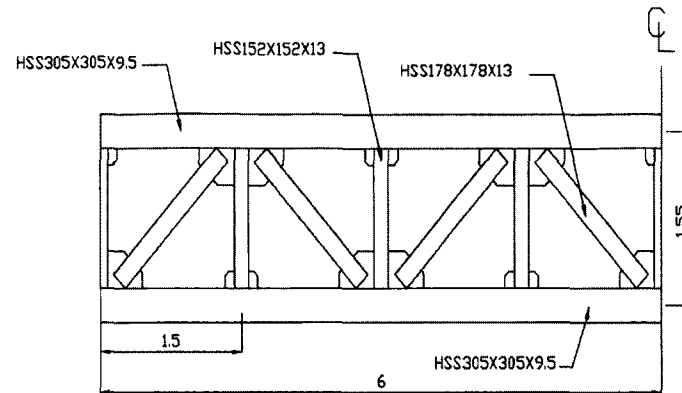
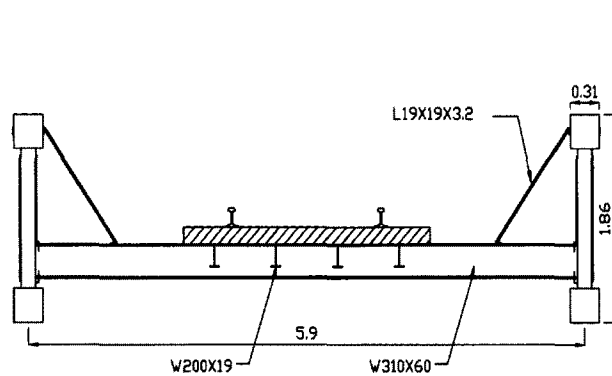
CROSSSTIES  
0.25X0.15X2.61

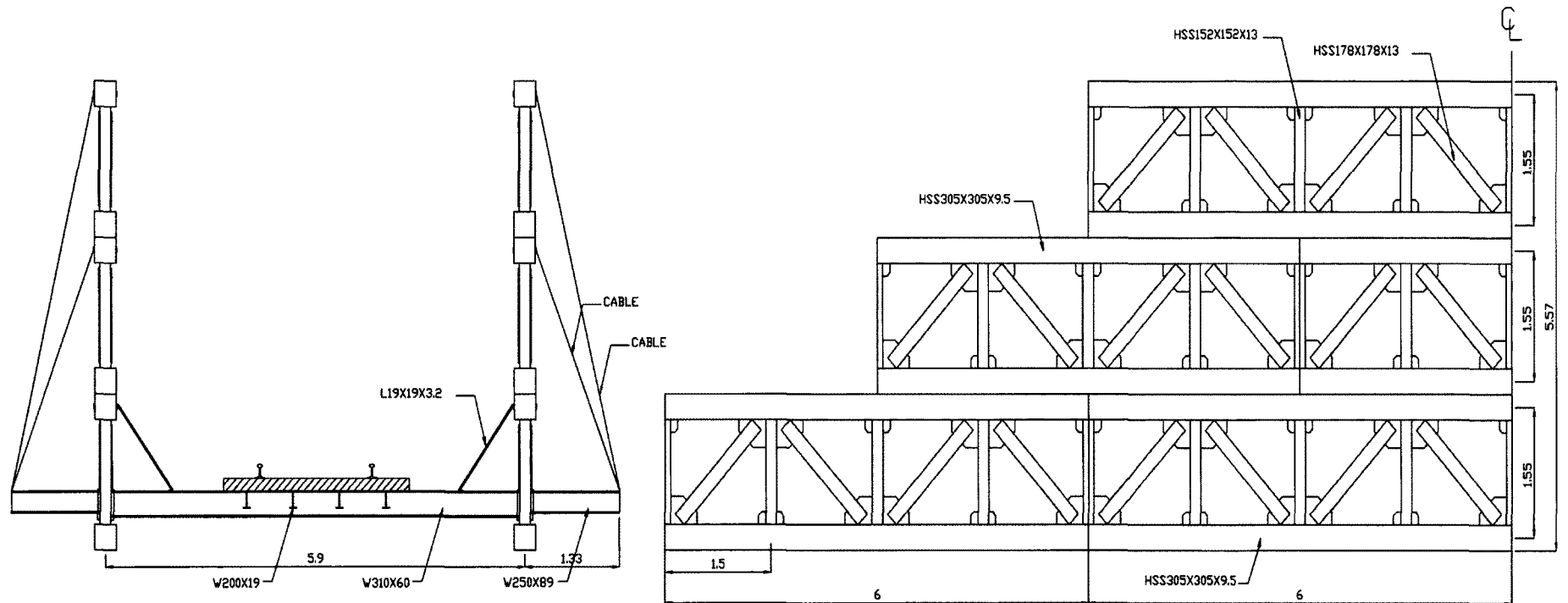


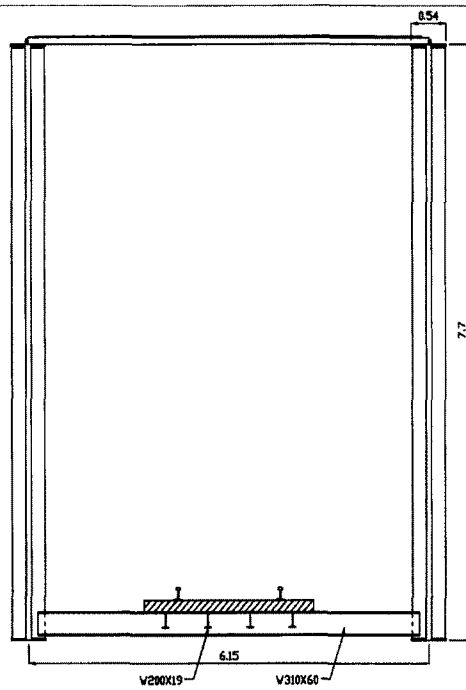




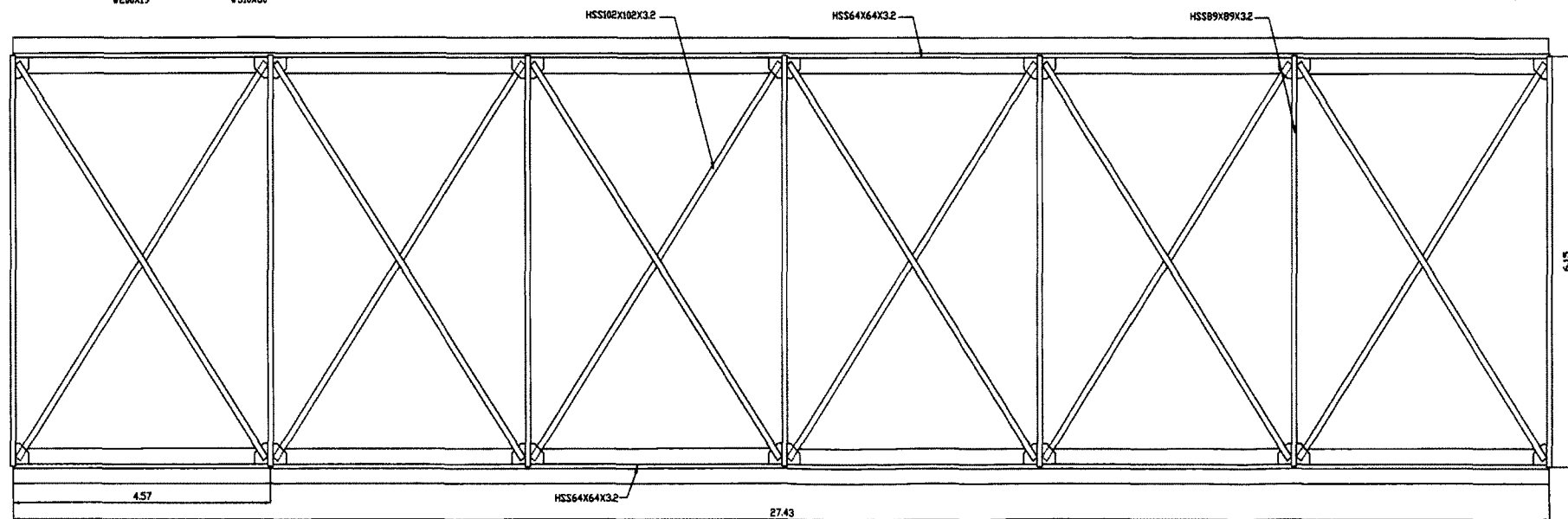


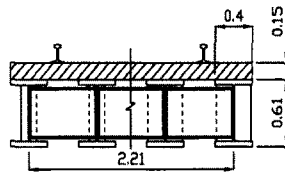




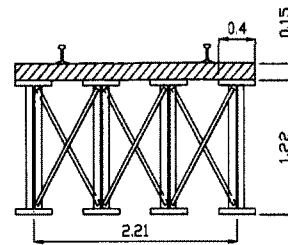


Plan view

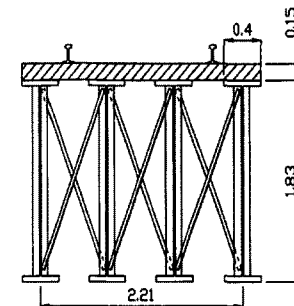




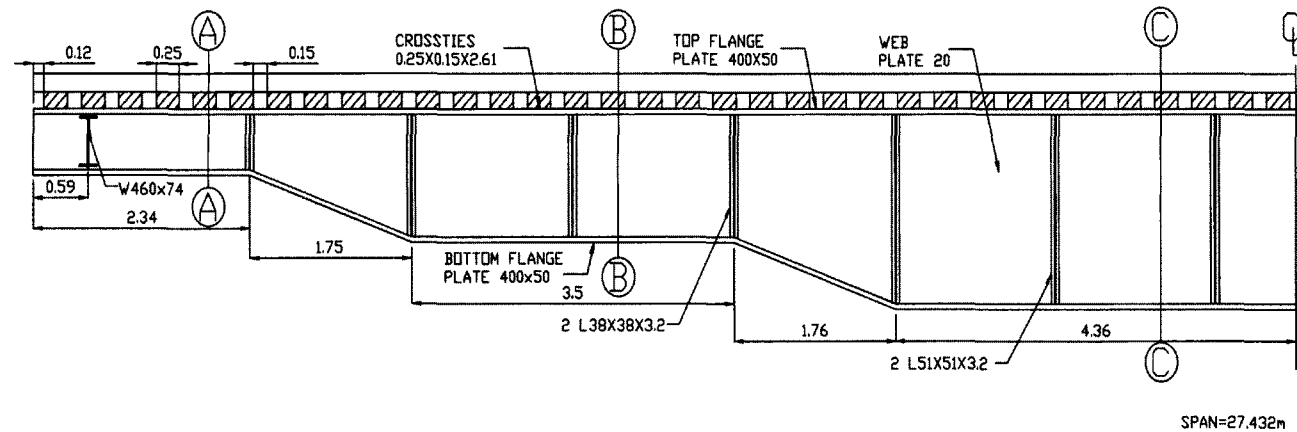
Section A-A

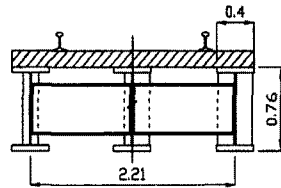


Section B-B

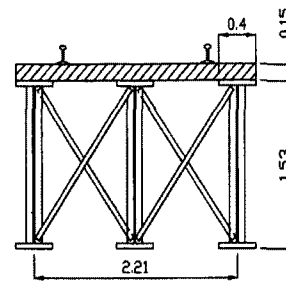


Section C-C

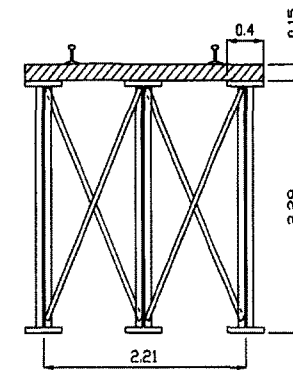




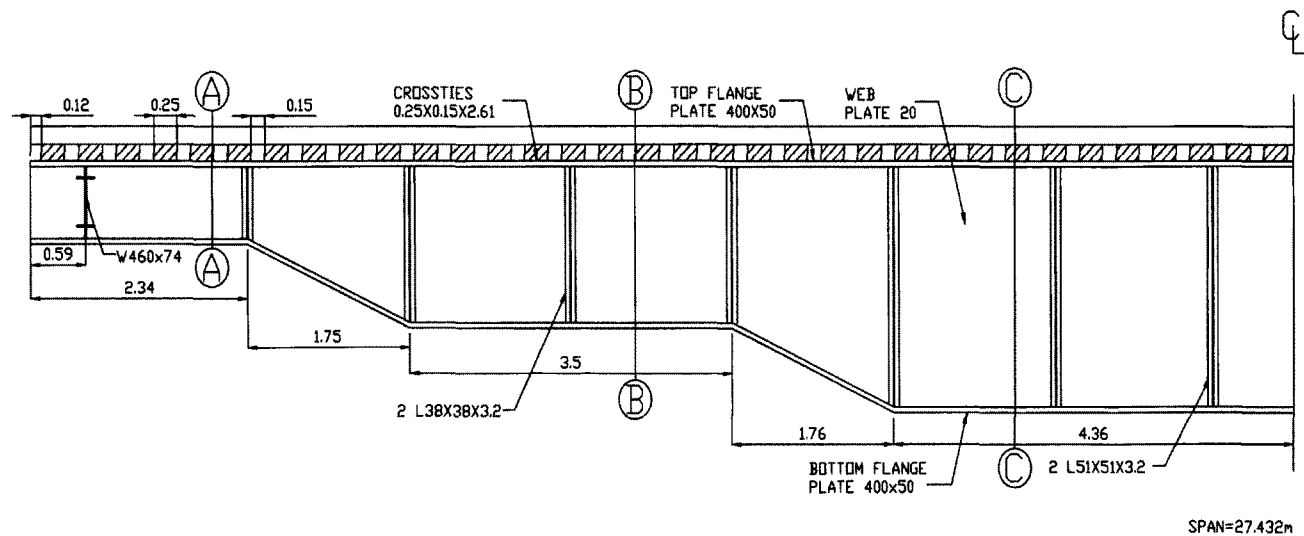
Section A-A

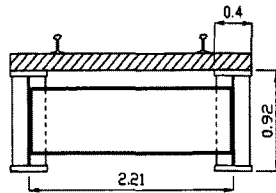


Section B-B

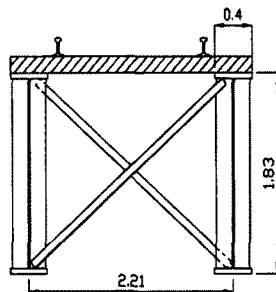


Section C-C

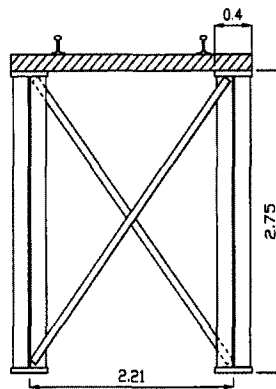




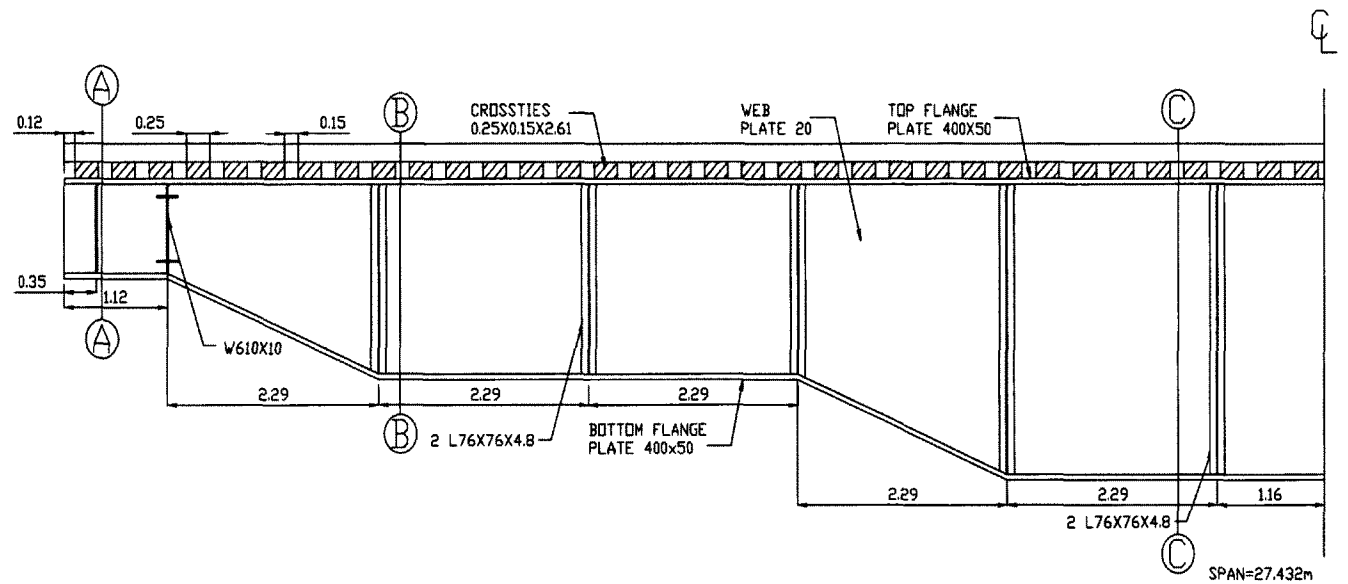
Section A-A

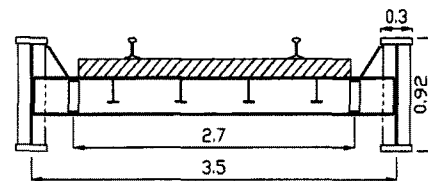


Section B-B

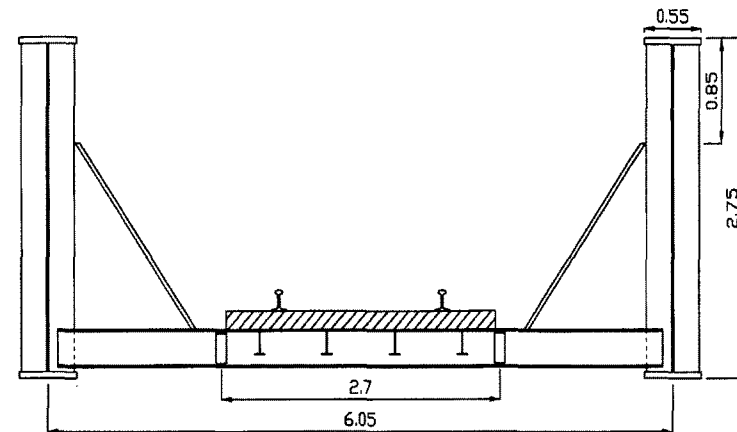


Section C-C

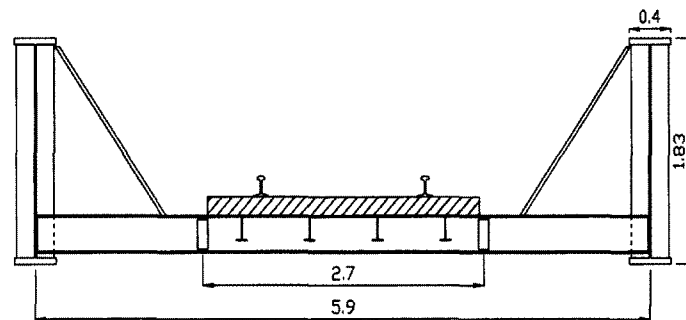




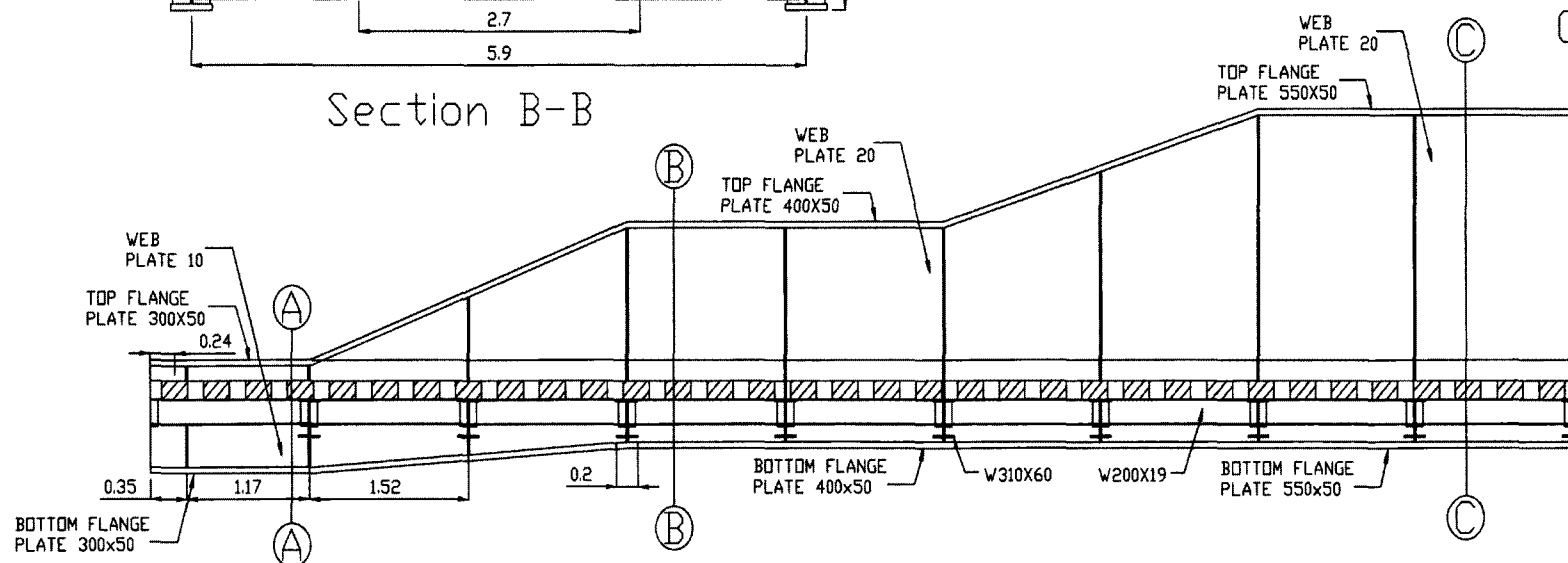
Section A-A



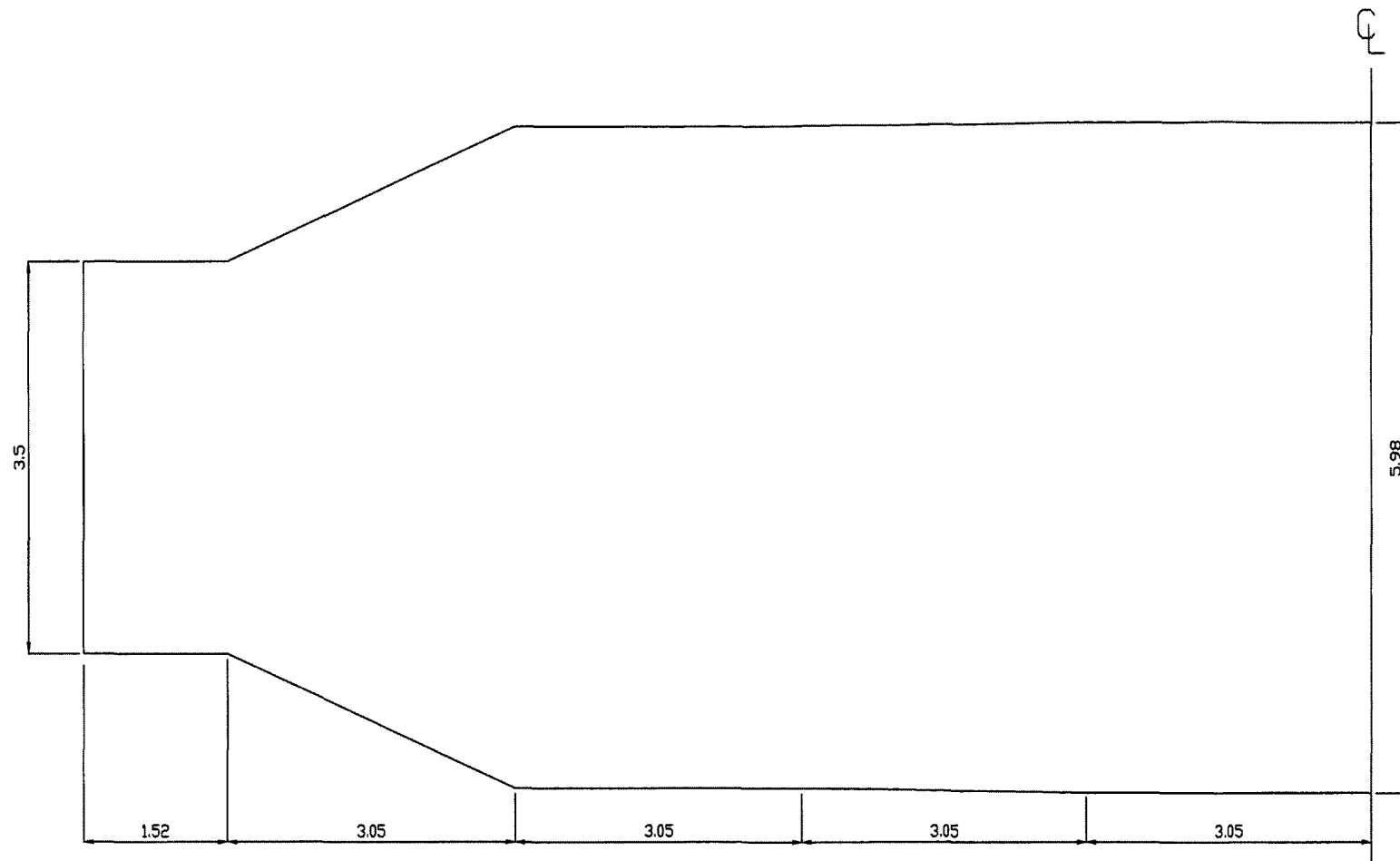
Section C-C



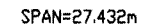
Section B-B

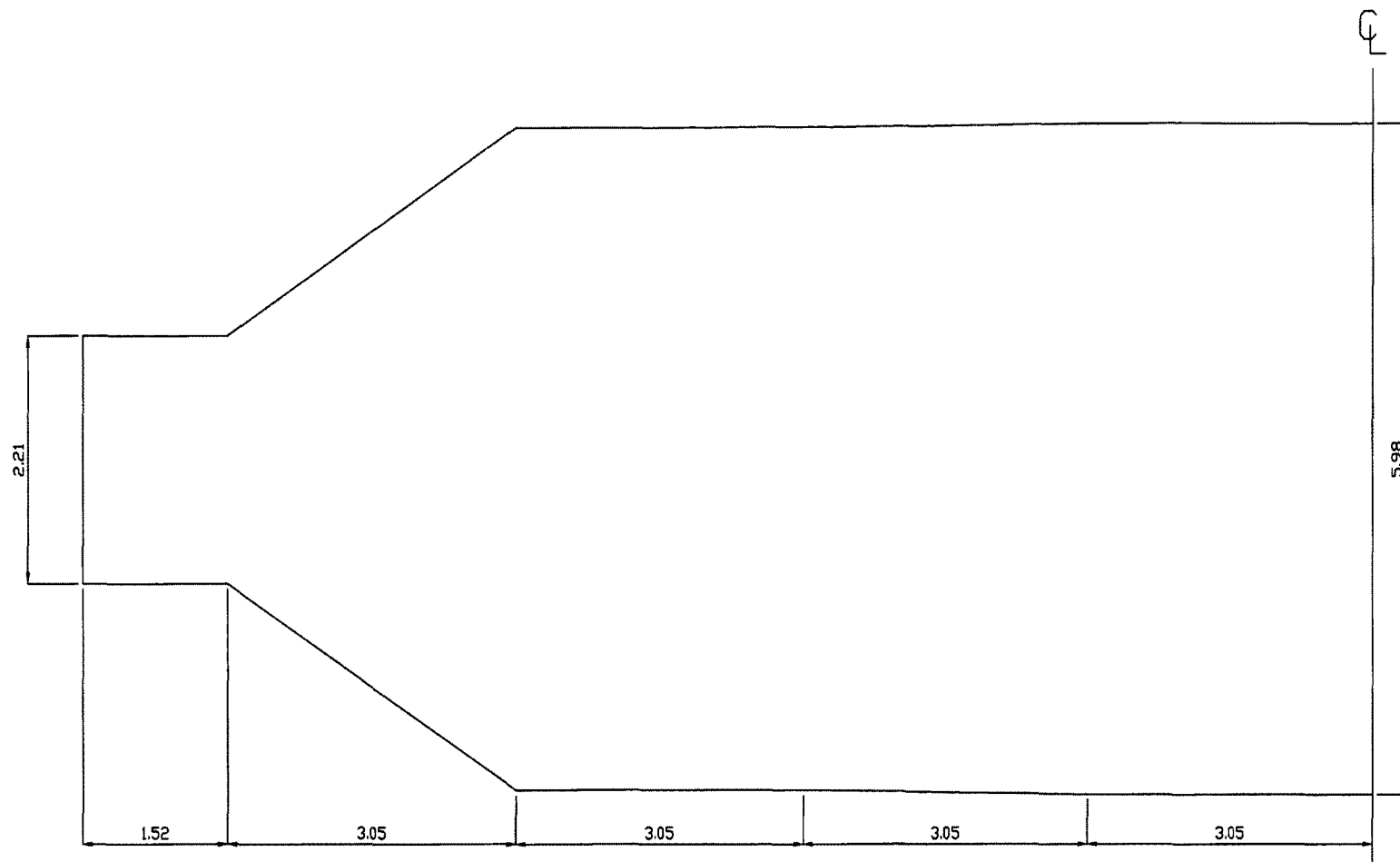


SPAN=27.432m







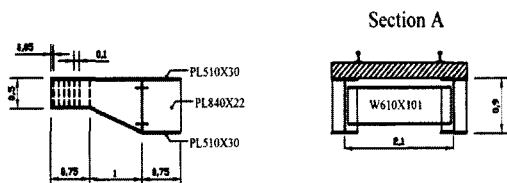


Plan view

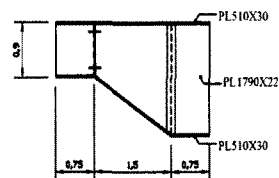
## ANNEXE C

### PLANS – ÉTUDE PRÉLIMINAIRE

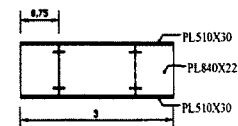




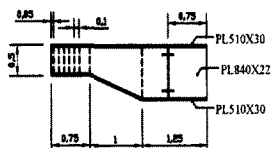
Section A



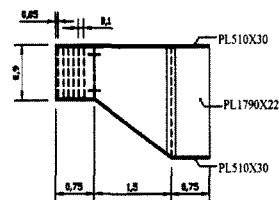
Section B



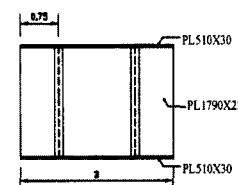
Section D



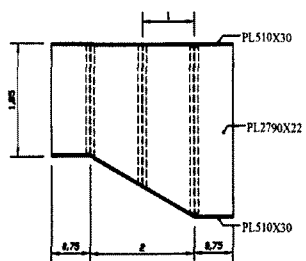
Section A-2



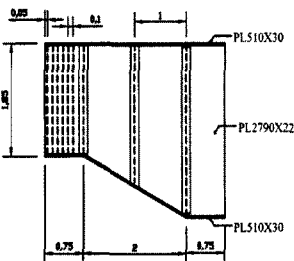
Section B-2



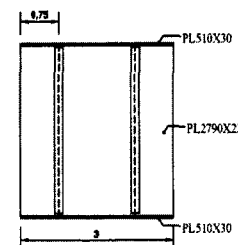
Section D-2



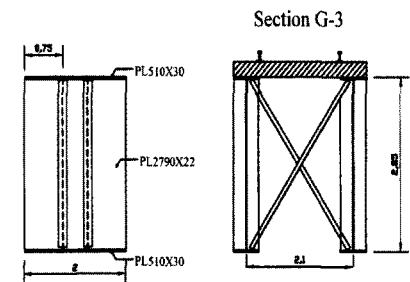
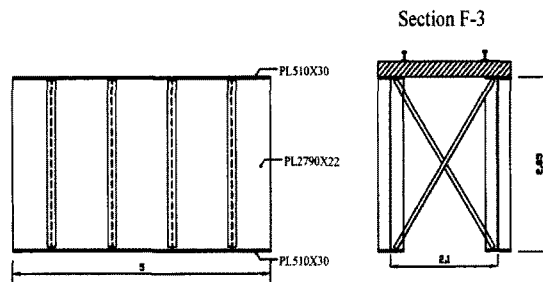
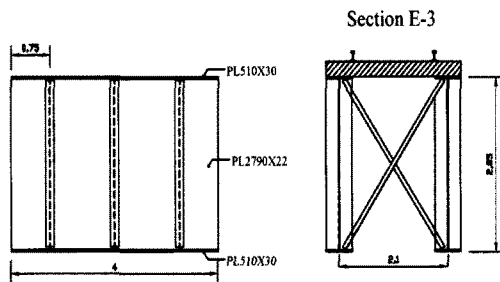
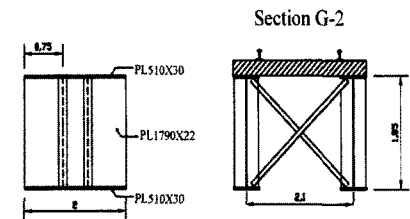
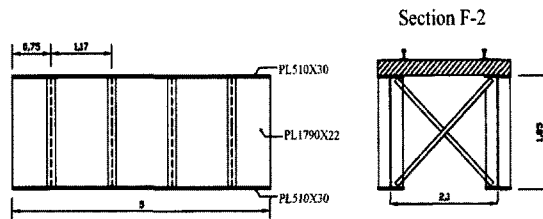
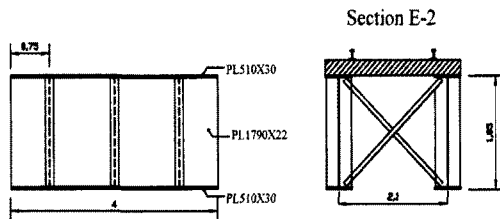
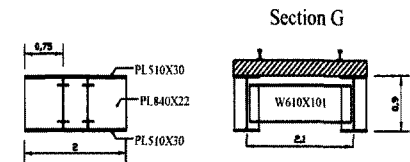
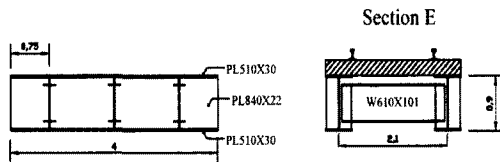
Section C



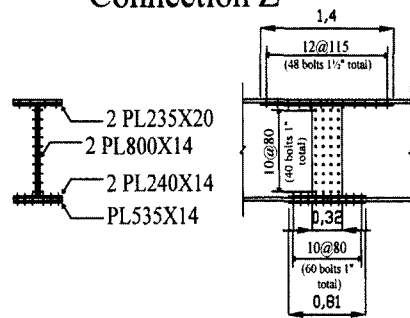
Section C-2



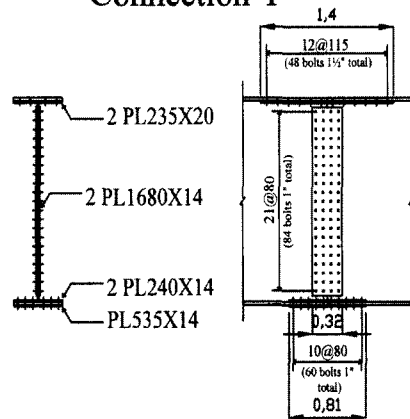
Section D-3



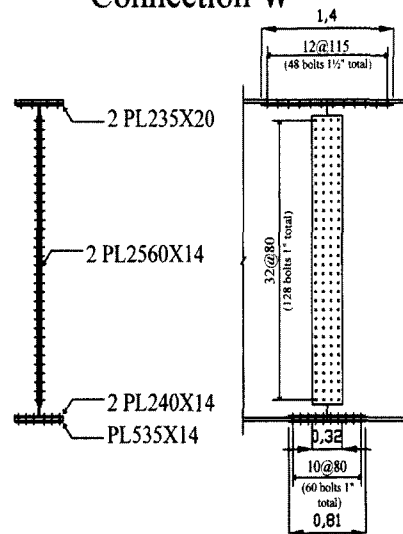
### Connection Z

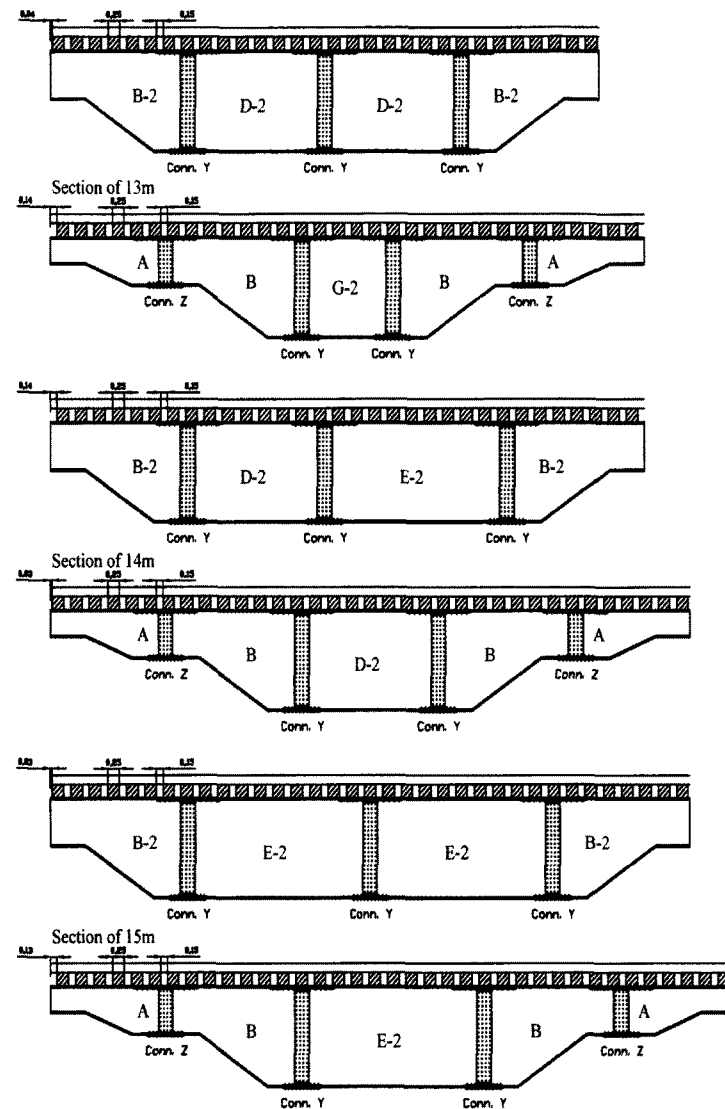
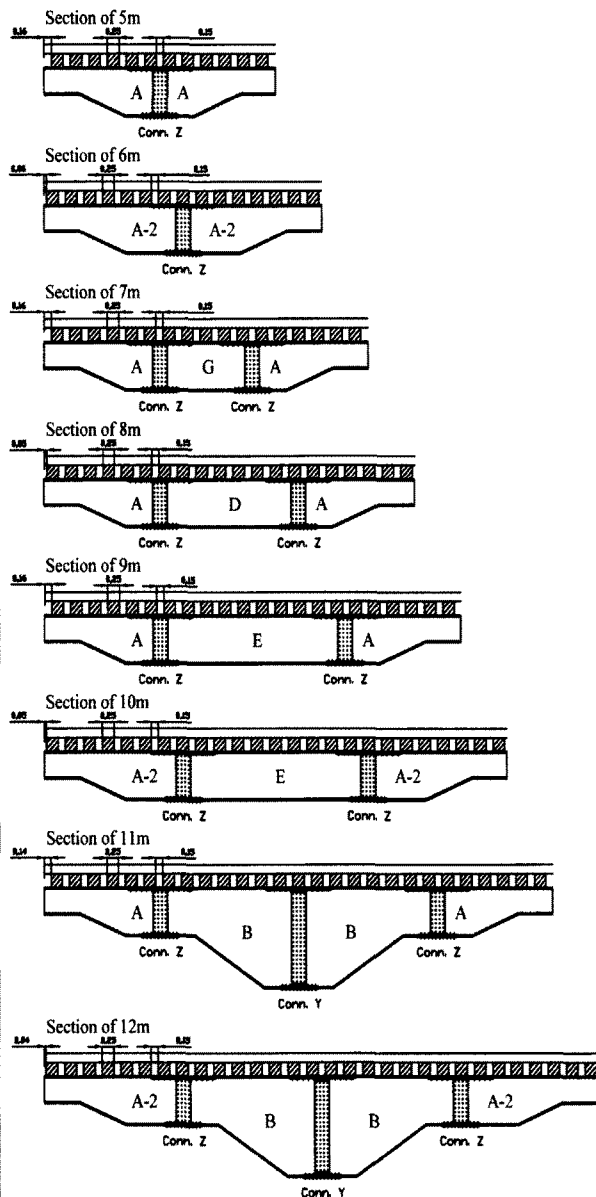


### Connection Y

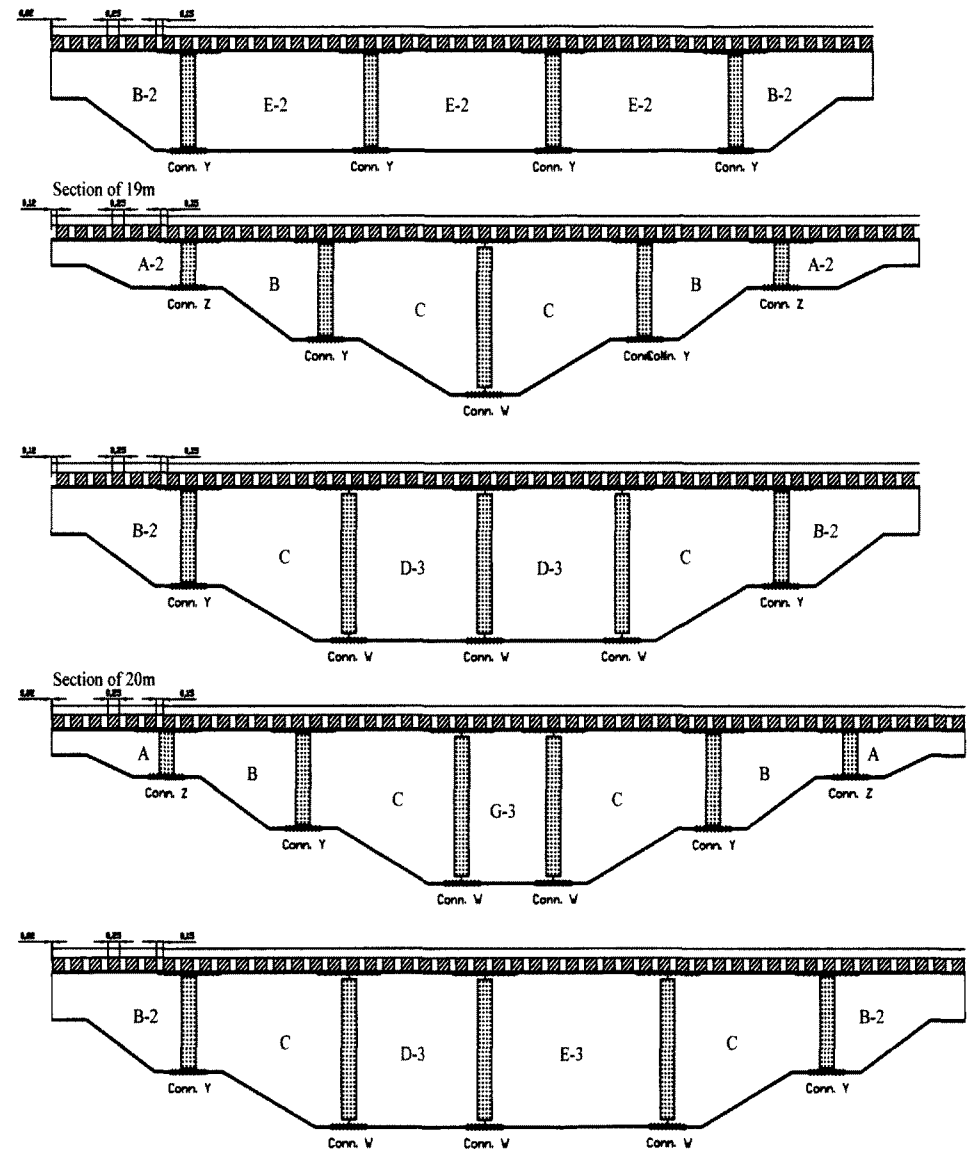
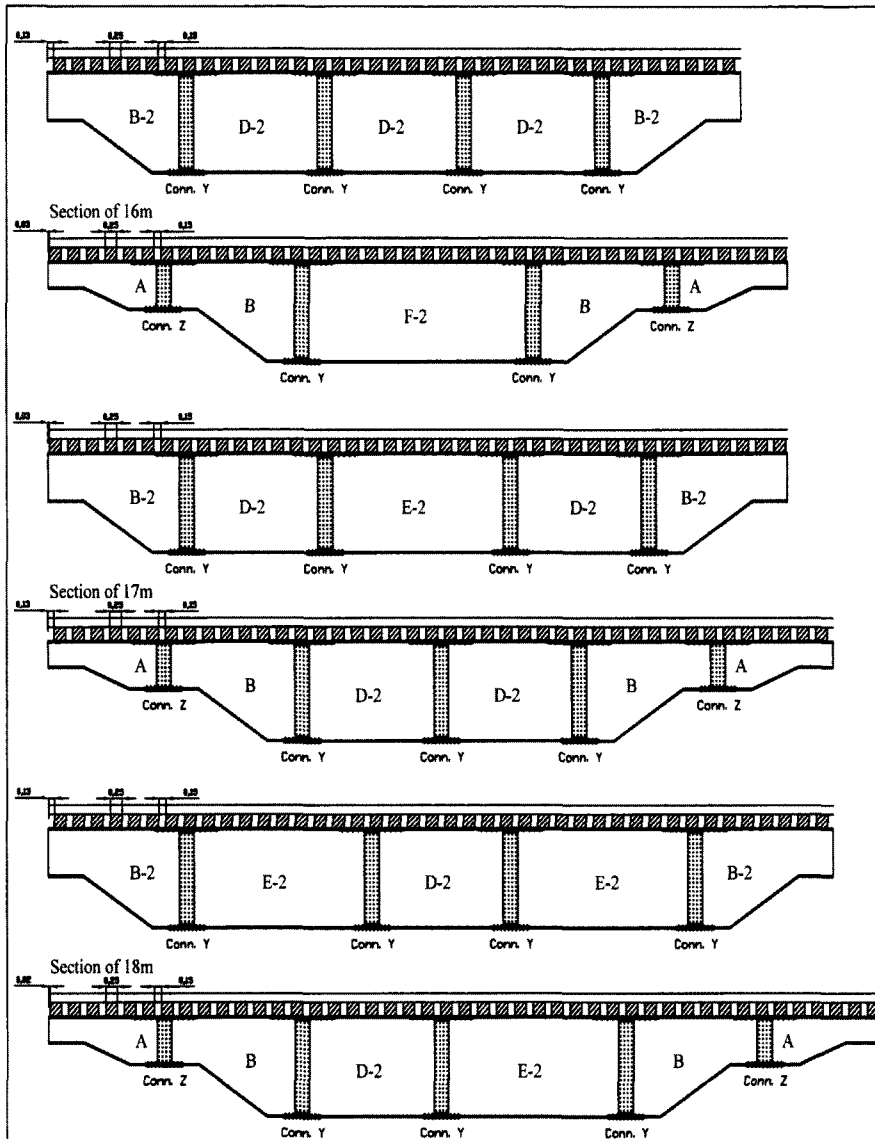


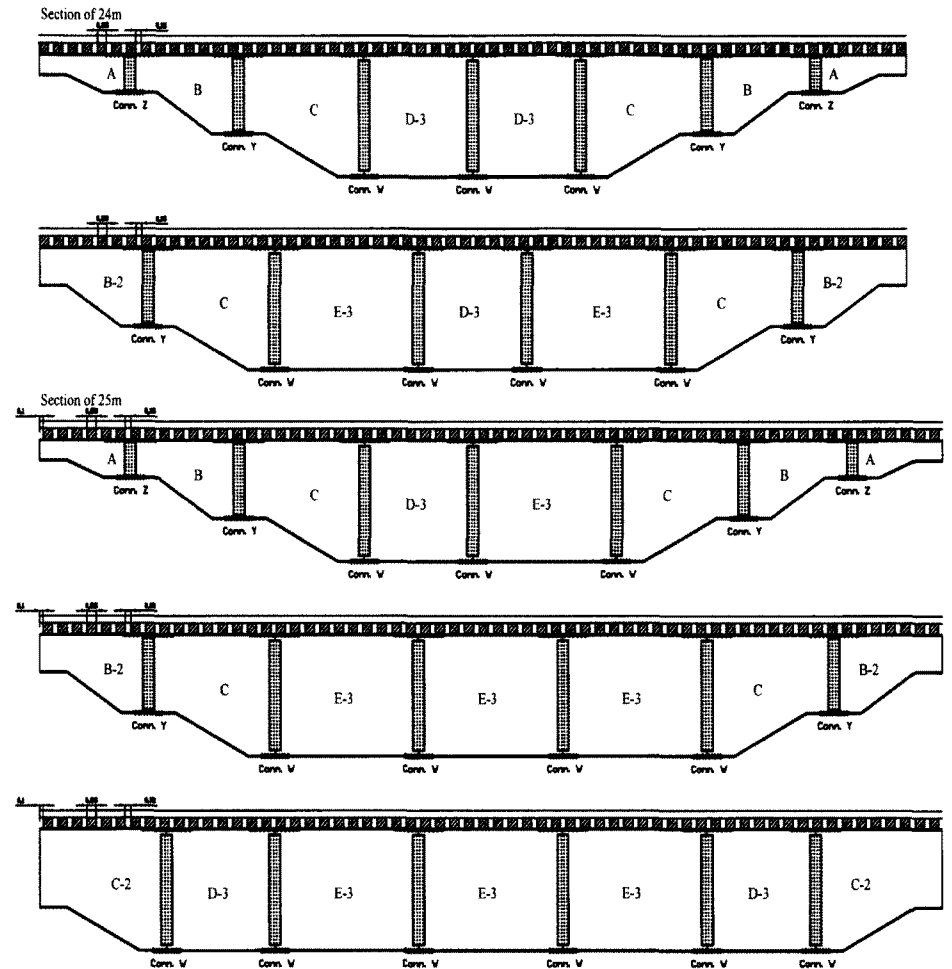
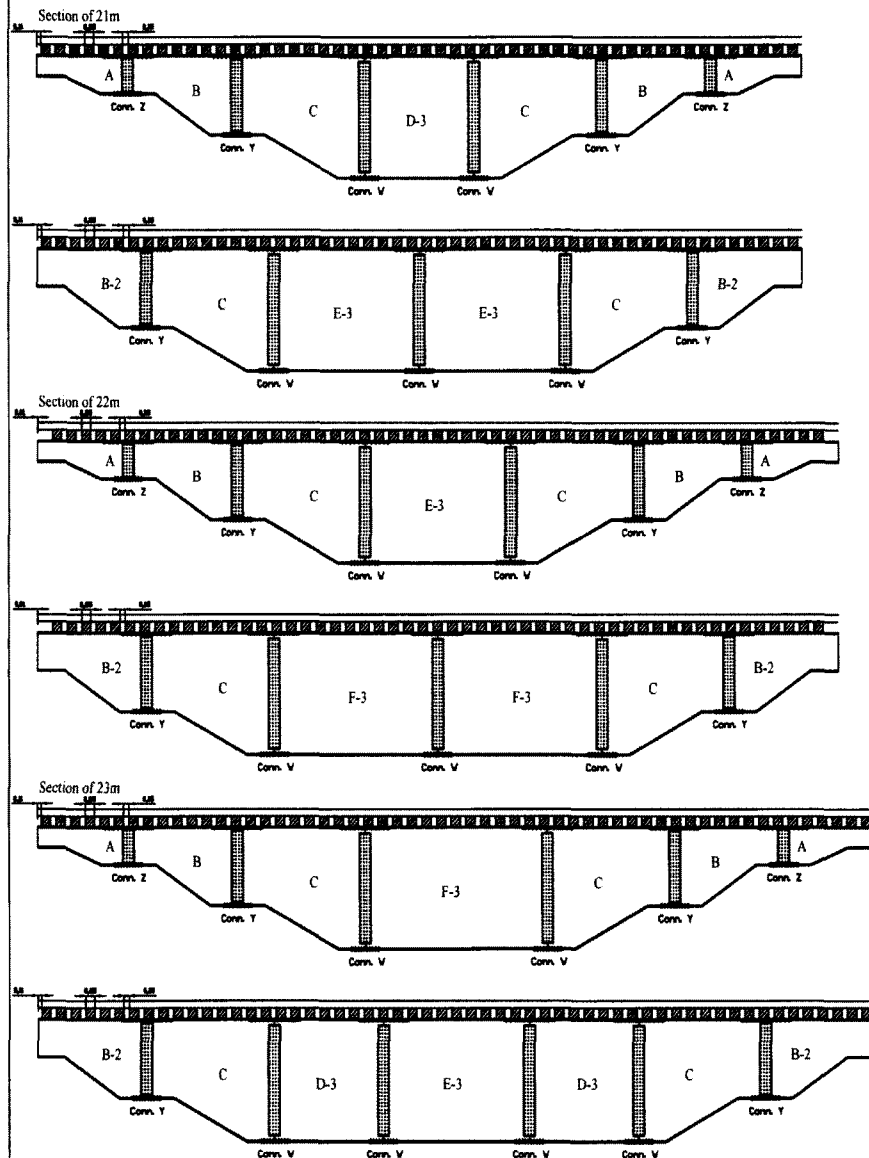
### Connection W

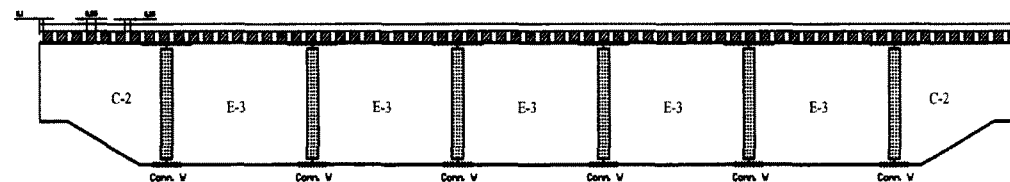
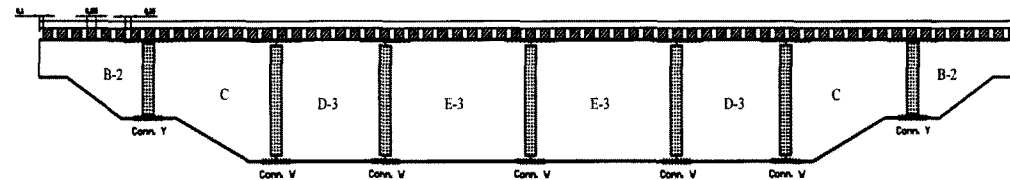
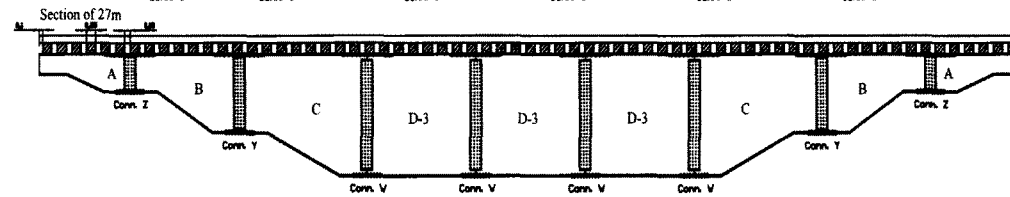
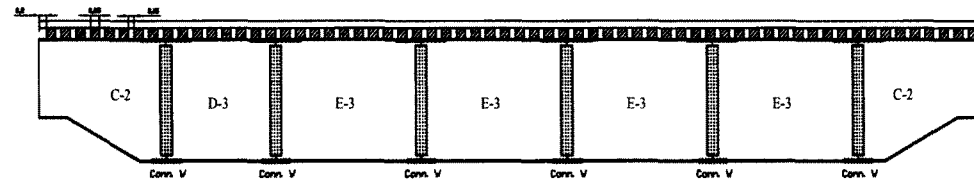
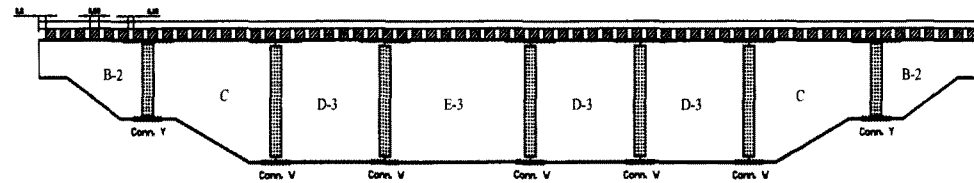
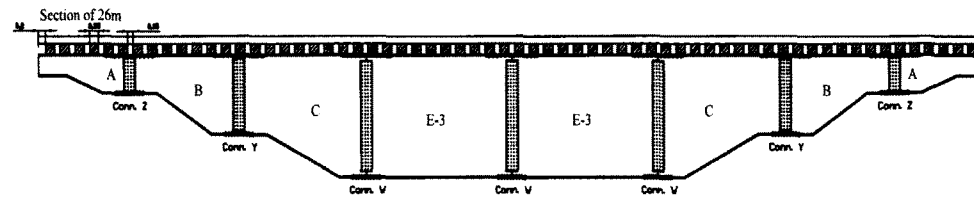


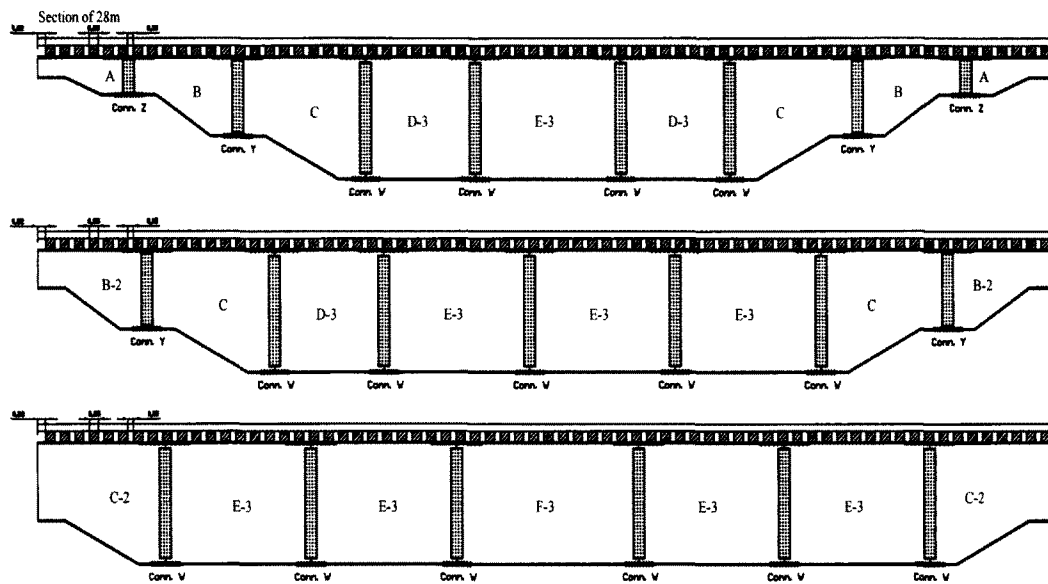




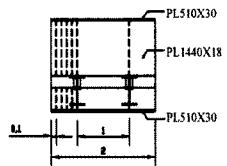




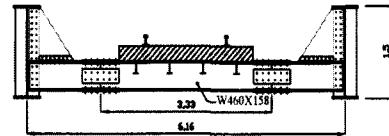
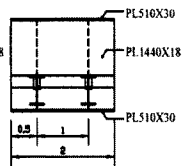




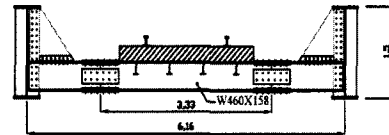
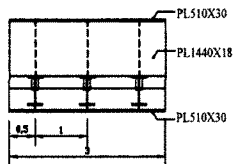
Section A



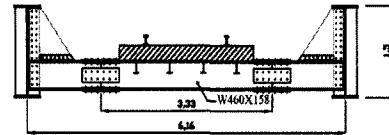
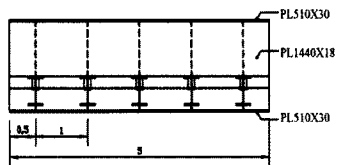
Section B



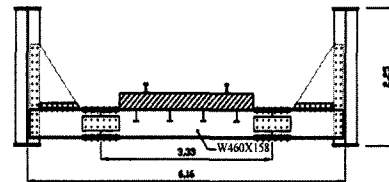
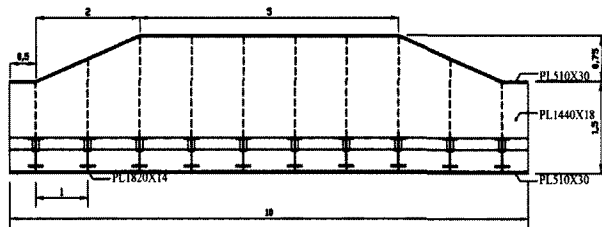
Section C



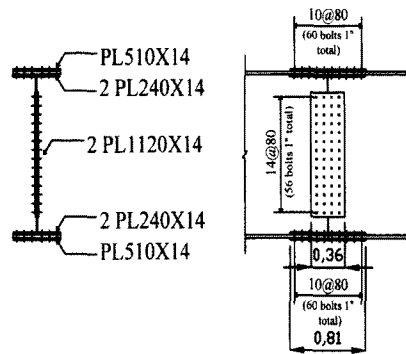
Section D



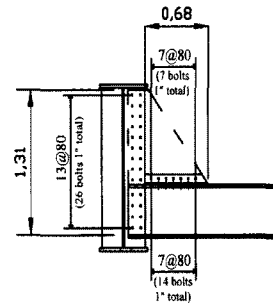
Section E



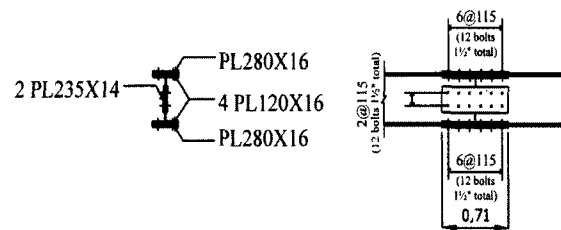
Connection Z



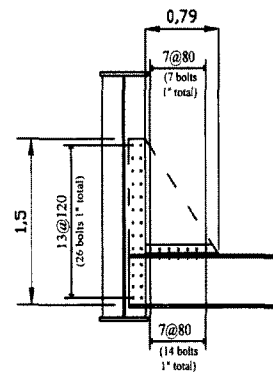
Connection X



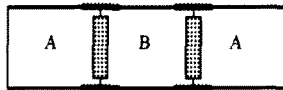
Connection Y (50% of capacity)



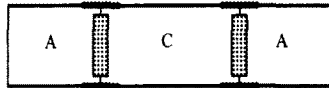
Connection W



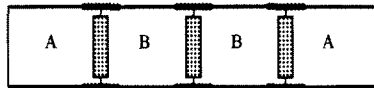
Section of 6m



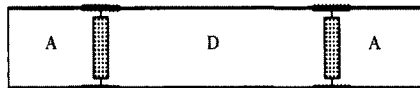
Section of 7m



Section of 8m



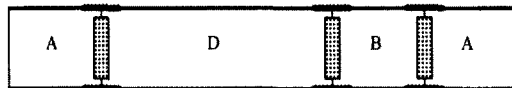
Section of 9m



Section of 10m



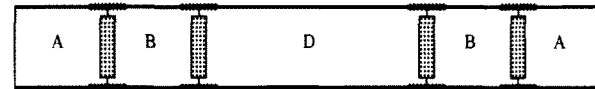
Section of 11m



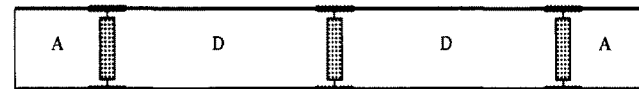
Section of 12m



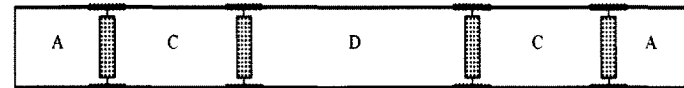
Section of 13m



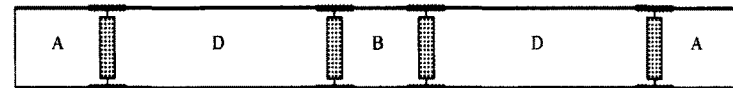
Section of 14m



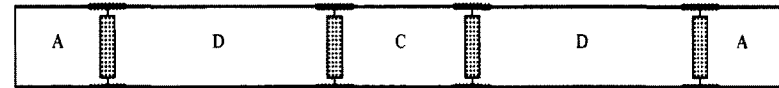
Section of 15m



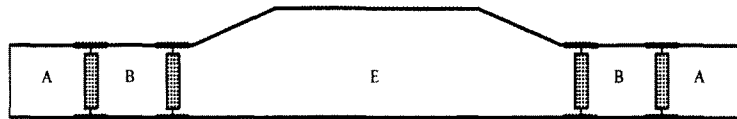
Section of 16m



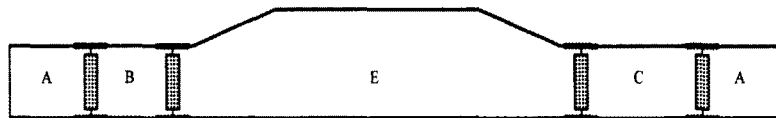
Section of 17m



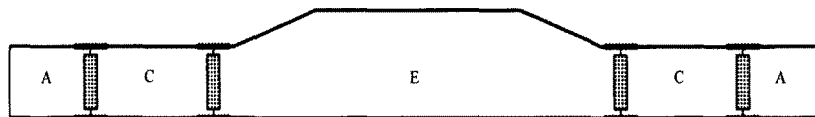
Section of 18m



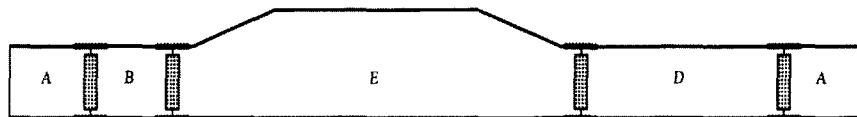
Section of 19m



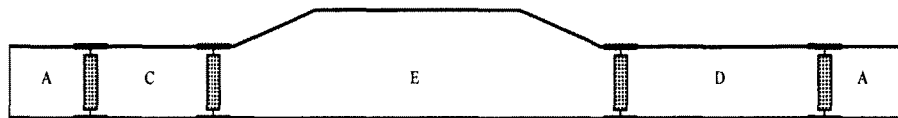
Section of 20m



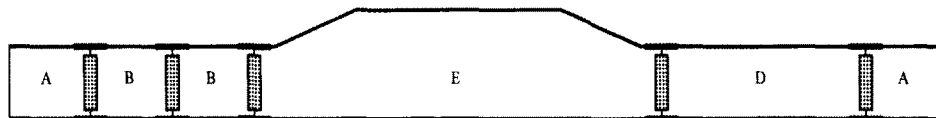
Section of 21m



Section of 22m

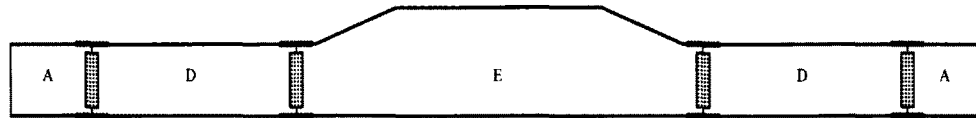


Section of 23m

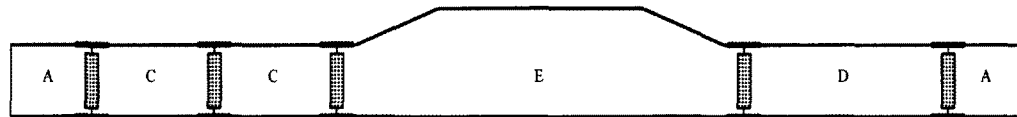




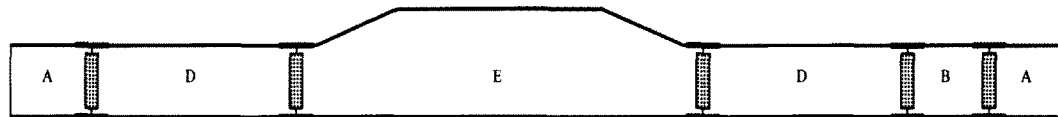
Section of 24m



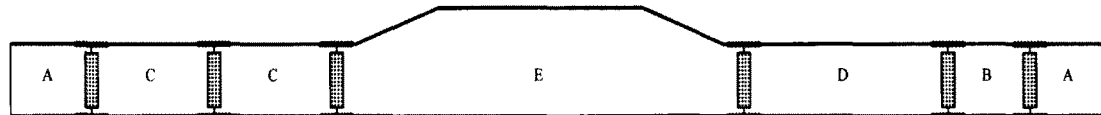
Section of 25m



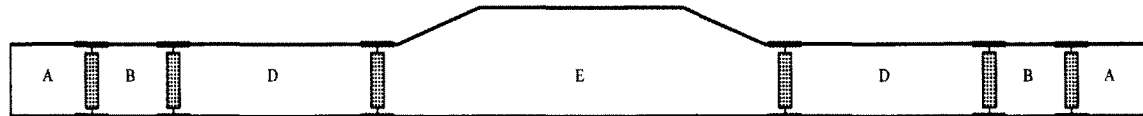
Section of 26m



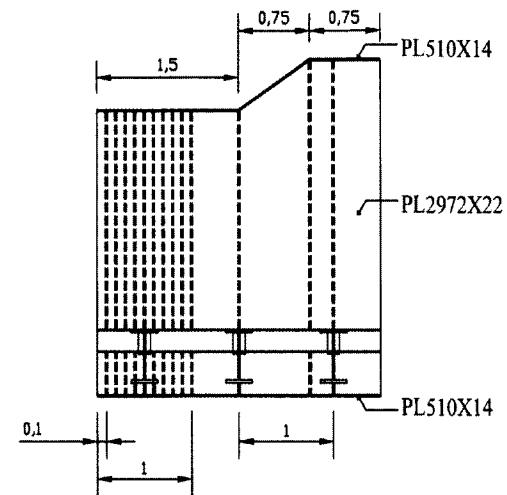
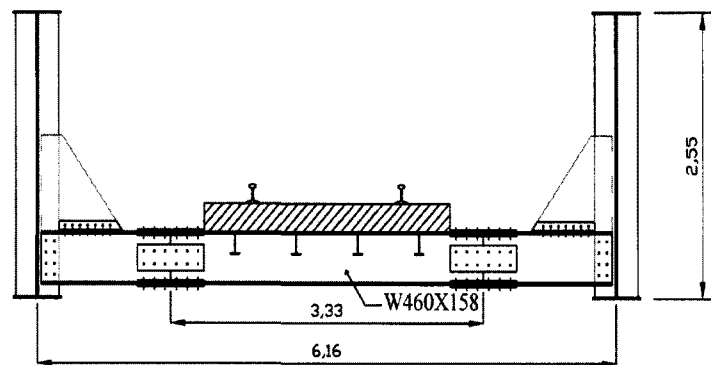
Section of 27m



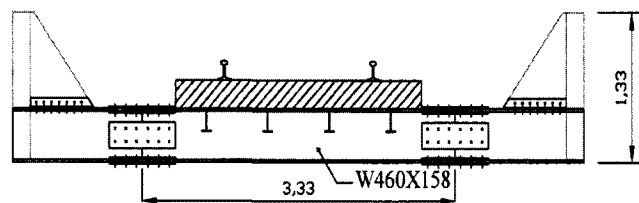
Section of 28m



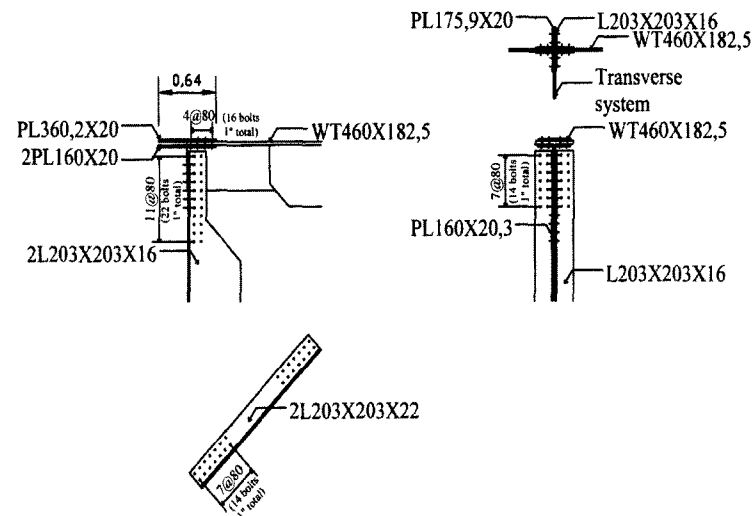
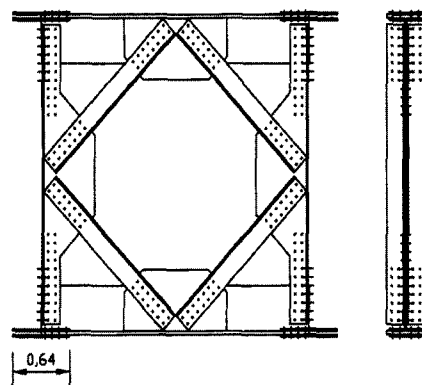
End panel



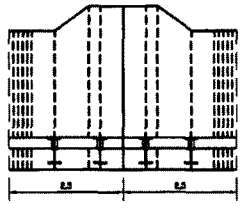
Transverse panel



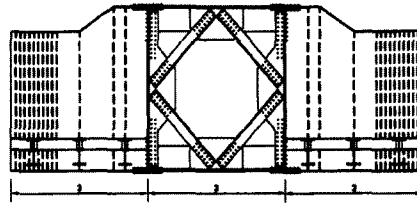
# Truss panel



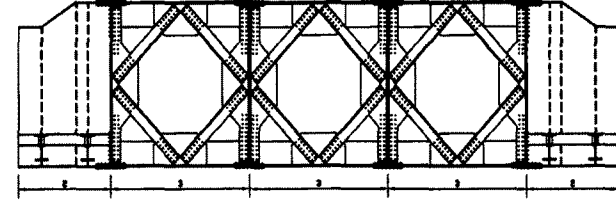
Section of 5m



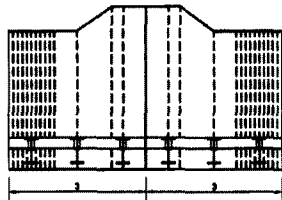
Section of 9m



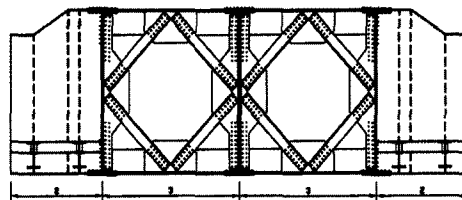
Section of 13m



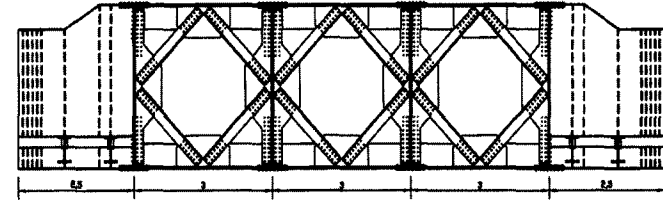
Section of 6m



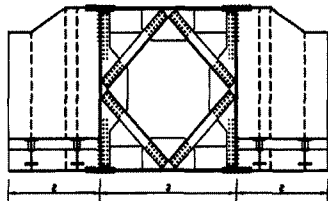
Section of 10m



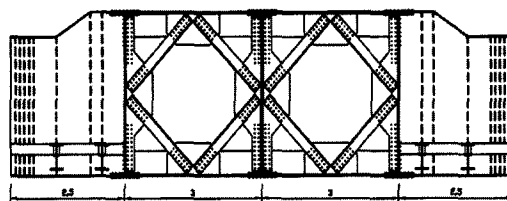
Section of 14m



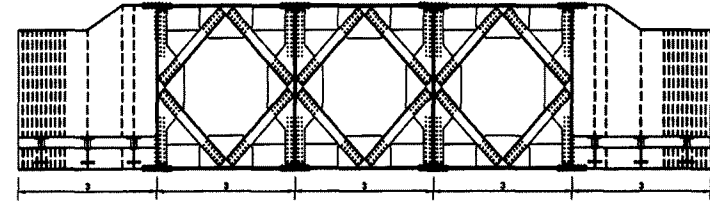
Section of 7m



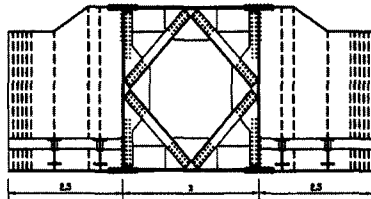
Section of 11m



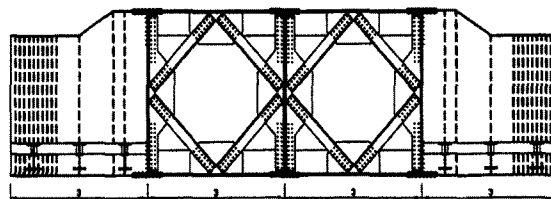
Section of 15m



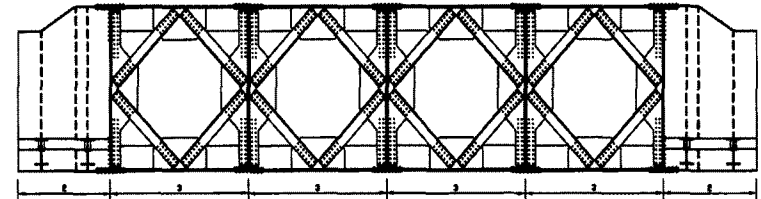
Section of 8m



Section of 12m



Section of 16m



UNIVERSITÉ DE  
SHERBROOKE

Nom : Maude Tremper  
Matricule : 03 358 084  
Date : 2010 April 14

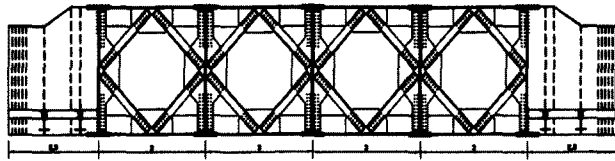
DEVELOPMENT OF A PORTABLE RAILWAY BRIDGE CONCEPT: Preliminary Design's Drawings

Through Truss - Optimized Design

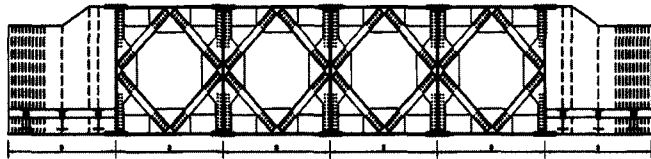
Facteur d'échelle: Various  
Échelle: Various

016

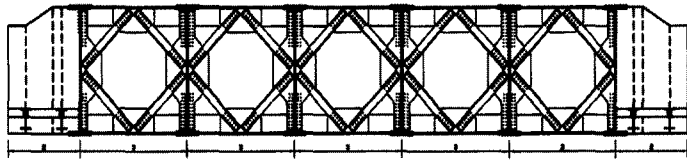
Section of 17m



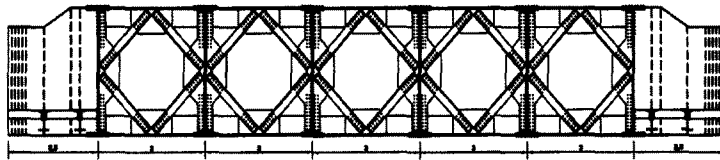
Section of 18m



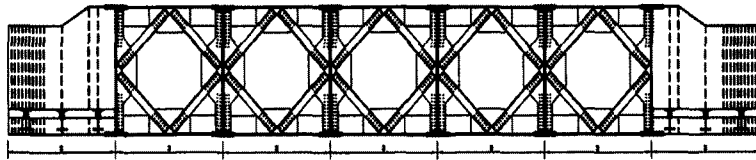
Section of 19m



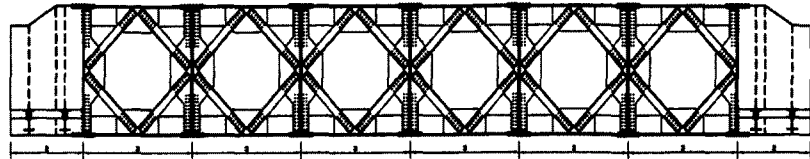
Section of 20m



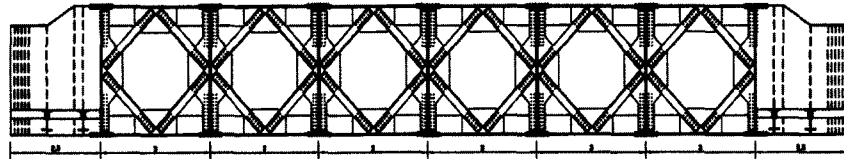
Section of 21m



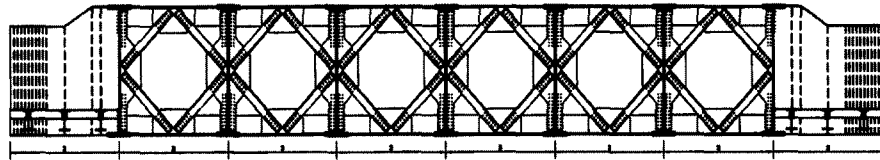
Section of 22m



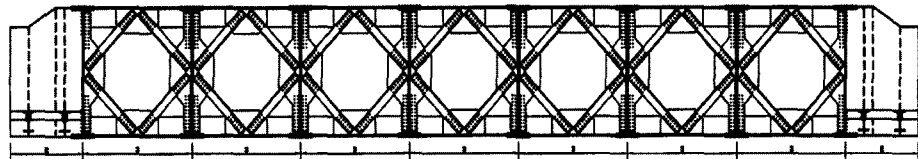
Section of 23m



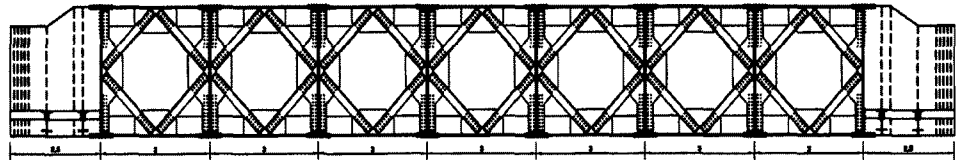
Section of 24m



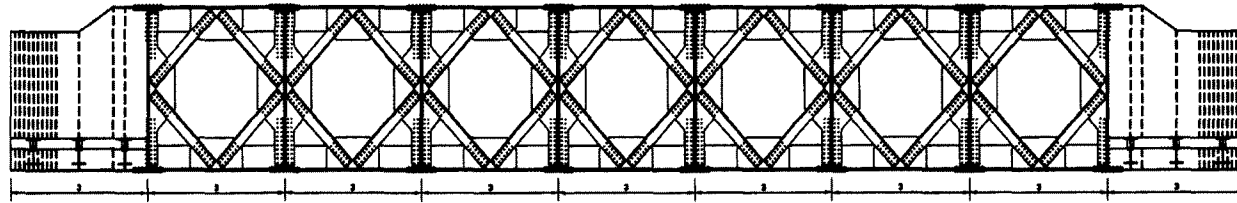
Section of 25m



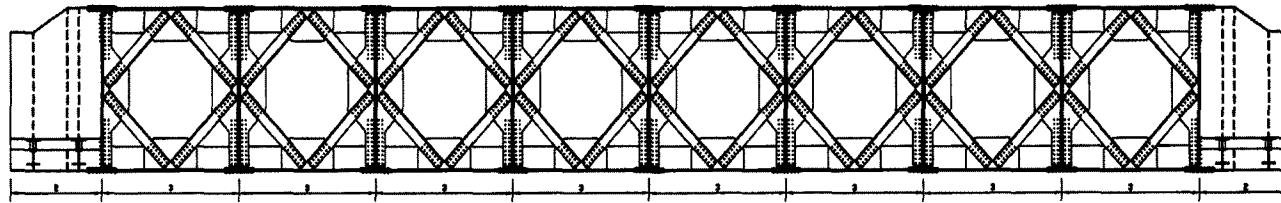
Section of 26m



Section of 27m



Section of 28m



## ANNEXE D

### DOCUMENTS POUR LE CN (DVD)

D.1 *Deck and Ballast Options*

D.2 *Abstract*

D.3 *Preliminary Study*

D.4 *Présentation*

D.5 *Project Constraints*

D.6 *Recommended Solutions*

D.7 *Short and Medium Conference - Abstract*

D.8 *Groupe de travail*

D.8.1 *Documents révisés*

*Abstract of solutions*

*Deck and Ballast Options*

*Project Constraints*

*Recommended Solutions*

D.8.2 *Final Report*

*Plans*

*Presentation of the Reports*





# LISTE DES RÉFÉRENCES

## Ouvrage

American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA). (2003). *Manual for Railway Engineering*.

Association canadienne de normalization. (2006). *CAN/CSA-S6-06 Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. Mississauga, Ontario, 820 p.

Bai, Y. et W.R., Burkett. (2006). Rapid bridge Replacement Processes, Techniques, and Needs for Improvements. *Journal of Bridge Engineering and Management*, volume 132, numéro 11, p. 1139-1147.

Canadian National Railway. (2006). *All Metric Drawings*, 39p.

Canadian National Railway. (2006b). *Guidelines for Railway Bridges*. Edmonton, Canada, 55p.

Canadian National Railway. (2006c). *Ingénierie normes de la voie*. 194p.

Chen, Wai-Fah. Lian Duan. (2000). *Bridge Engineering Handbook*. USA: CRC PressP, USA.

Institut canadien de la construction en acier. (2003). *Handbook of Steel Construction*.

Ministère des transports du Québec. (2004). *Manuel de conception des structures, volume 1*. Direction des structures.

Ministère des Transports du Québec. (2004b). *Guide des normes de charges et dimensions des véhicules*, édition 2005.

Siwowski, T. (2006). Aluminium Bridges - Past, Present and Future. *Structural Engineering International*, volume 16, numéro 4.

Wight, R.G., Erki, M.A., Shyu, C.T., Tanovic, R., Haffernan, P.J. (2006). Development of FRP Short-Span Deployable Bridge - Experimental Results. *Journal of bridge engineering*, volume 11, numéro 4, p. 489-498.

## Site web

AASHTO Region 4 Research Advisory Committee Meeting. *Rapid Bridge Replacement Techniques*. [http://www.transportation.org/sites/research/docs/D\\_Yang\\_PPT.PDF](http://www.transportation.org/sites/research/docs/D_Yang_PPT.PDF).

A&K Railroad Materials Inc. (2007). *Dimensions for Tee Rail Data Table*. <http://www.akrailroad.com/OnlineRailroadCatalog/RailJointBars/TeeRailSectionsData/tabid/76/Default.aspx>.

Balfour Beatty Power Networks. *C-H Bridges*. <http://www.bbpl.com/content.asp?id=130&area=1>.

Canadian National Railway (2005). *Engineering specifications for industrial tracks*. [http://www.cn.ca/PDF/IndustTrackSpecGuide2005\\_new\\_en.pdf](http://www.cn.ca/PDF/IndustTrackSpecGuide2005_new_en.pdf).

Canadian National Railway. *Ressource Center*. [http://www.cn.ca/productsservices/metals\\_minerals/resource\\_centre/equipment/fr\\_MME\\_Equipment.shtml](http://www.cn.ca/productsservices/metals_minerals/resource_centre/equipment/fr_MME_Equipment.shtml).

Center for Multidisciplinary Research in Transportation. Texas Tech University. *Rapid Bridge Replacement Techniques Research Report*. [http://www.dot.state.oh.us/se/SI9/4568\\_\\_\\_3.pdf](http://www.dot.state.oh.us/se/SI9/4568___3.pdf).

Department of Civil and Environmental Engineering. University of Cincinnati. *Innovative Bridge Design/Construction Techniques to Expedite Construction*. <http://www.dot.state.oh.us/research/2005/structures/14791-FR.pdf>.

Freeby, G., Medlock, R., Slagle, S. (2007). *Prefabricated bridge innovations*. [http://www.dot.state.tx.us/publications/bridge/prefabricated\\_inovations.pdf](http://www.dot.state.tx.us/publications/bridge/prefabricated_inovations.pdf) (page consultée le 9 avril 2008).

L'Encyclopédie canadienne (2011). *Le premier chemin de fer du Canada*. <http://www.thecanadianencyclopedia.com/index.cfm?PgNm=ArchivedFeatures&Params=F278> (page consultée le 4 décembre 2011).

Nebraska University of Nebraska-Lincoln College of Engineering & Technology (2000). *Fiber-Reinforced Polymer Bridge Decks*. <http://www.nabro.unl.edu/articles/20000805/index.asp>.

Office québécois de la langue française (2008). *Grand dictionnaire terminologique*. <http://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/gdt.html>.

Radio Canada, Archives. *Nostalgie ferroviaire, 20 juin 1984*. [http://archives.radio-canada.ca/economie\\_affaires/transports/clips/12352/](http://archives.radio-canada.ca/economie_affaires/transports/clips/12352/).

Ray Anthony intl. *650 ton Telescopic Crane Demag AC 1600*. <http://rayanthonyintl.com/loadcharts/Demag/Hydro%20Truck%20Crane/AC%201600%20%20Demag%20650%20Ton%20.pdf>.

Réseau ferré de France. *La voie sans ballast: une innovation en béton*. <http://www.lgv-est.com/medias/pdf/medias1185.pdf> (page consultée le 18 Juin 2007).

State of California Department of Transportation (2003). *Lessons Learned from the Tappan Zee Bridge, New York*. [http://dot.ca.gov/hq/esc/Translab/pubs/Tappan\\_Zee\\_Bridge\\_Report.pdf](http://dot.ca.gov/hq/esc/Translab/pubs/Tappan_Zee_Bridge_Report.pdf).

Statistique Canada (2010). *Annuaire du Canada 2010 no.11-402-X au catalogue*. <http://www.statcan.gc.ca/pub/11-402-x/2010000/chap/trans/trans-fra.htm>, page consultée le 4 décembre 2011.

Statistiques des Transports en Amérique du Nord - Base de données (2006). *Les transports et l'économie, Tableau 2-2: Dépenses gouvernementales en transport par mode*. <http://nats.sct.gob.mx/nats/sys/tables.jsp?i=1&id=10> (Page consultée le 9 avril 2008).

SteelConstruction.org. *Balfour Beatty Power Networks Ltd*. [http://www.steelconstruction.org/steelconstruction.view?entityID=43&jsp=member\\_viewer&sessionID=-1182549688767&entityName=member](http://www.steelconstruction.org/steelconstruction.view?entityID=43&jsp=member_viewer&sessionID=-1182549688767&entityName=member).

TSO. *Savoir faire*. [http://www.tso.fr/Savoir\\_faire\\_fr.php](http://www.tso.fr/Savoir_faire_fr.php) (page consultée le 18 juin 2007).

U.S. Bridge Bridging America Since 1936 *U.S. Bridge Advantage*. <http://www.usbridge.com/custom.asp>.

U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (2008). *Prefabricated Bridge Elements and Systems in Japan and Europe*. <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/prefab/pbesscan.htm>.

U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (2008). *Final Report Prefabricated Steel Bridge Systems*. <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/prefab/psbsreport03.cfm>.

## Plan

Canadian National, Bureau de l'Ingénieur en chef, *Bridge: MILE116.0, near: Giscome, B.C., General Arrangement, Elevation and Section*. Canada, Dessin numéro AA663-116.00-2.01, 23 mars 2006.

Canadian National, Bureau de l'Ingénieur en chef, *14.17m TPG SPAN (1 of 2)*. Dessin numéro R1A-10.25, 02 juin 1992.

Canadian National, Bureau de l'Ingénieur en chef, *14.18m D.P.G. Span (1 of 2)*. Dessin numéro R1A-61.05, 21 février 1995.

Canadian National, Bureau de l'Ingénieur en chef, *176'-9" TT Span, Stress Sheet*. Dessin numéro R1A-341.02, 28 février 2003.

Canadian National, Bureau de l'Ingénieur en chef, *26.48m DPG Span (1 of 2)*. Dessin numéro R1A-61.09, 02 juin 1992.

Canadian National, Bureau de l'Ingénieur en chef, *6.8m Beam Span*. Dessin numéro R1A-14.03.

Canadian National, Bureau de l'Ingénieur en chef adjoint – Charpentes, *25.15m T.P.G. Span, sheet 1 of 2*. Dessin numéro R1A-10.27, 28 septembre 2000.

Canadian National, Bureau de l'Ingénieur en chef adjoint – Charpentes, *27.55m D.P.G. Span (Sheet 1 of 3)*. Dessin numéro R1A-61.13, 23 février 2001.